

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

KATEDRA APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY A KARTOGRAFIE



**VYTVOŘENÍ MODELŮ BUDOV Z LETECKÝCH
MĚŘICKÝCH SNÍMKŮ A ŘÍDKÉHO BODOVÉHO
MRAČNA ALS**

**3D BUILDING EXTRACTION USING AERIAL IMAGERY AND
SPARSE LASER SCANNING POINT CLOUDS**

Diplomová práce

Petr Hofman

Vedoucí diplomové práce: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

Praha 2008

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl veškerou použitou literaturu a prameny.

Jsem si vědom toho, že případné použití výsledků, získaných v této práci, mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Praze dne 19. srpna 2008

.....

podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucí diplomové práce Ing. Markétě Potůčkové, Ph.D. i dalším zaměstnancům katedry aplikované geoinformatiky a kartografie UK za cenné rady a pomoc při tvorbě práce, Českému úřadu zeměměřickému a katastrálnímu za poskytnutá data a Mgr. Ladislavu Hofmanovi za pomoc s doladěním práce. Především bych chtěl poděkovat rodičům za podporu nejen během psaní diplomové práce, ale v průběhu celého studia.

Abstrakt

Teoretická část práce hodnotí existující metody vytváření 3D modelů budov z dat leteckého laserového skenování a leteckých měřických snímků. V praktické části je potom navržena nová metoda rekonstrukce budov využívající kombinace obou datových zdrojů a pozemních plánů budov. Metoda vychází z přístupu řízeného modelem. V první části je pomocí detekce hran barevného ortofota a obrazové korelace se vzory jednotlivých střešních pláštíů určen typ střešního pláště budovy. V druhé části je pomocí metody nejmenších čtverců vypočítána poloha střešních rovin z dat laserového skenování. Výška nejvyšší hrany určuje výslednou výšku budovy. Pomocí nástrojů programu ArcView 9.2 a funkcí vytvořených v programu Matlab 7.0.1 byla navržená metoda otestována na reálných datech z oblasti Brna a Sobotky.

Hlavním přínosem navržené metody je téměř úplná automatizace postupu a možnost práce i s velmi řídkým mračnem laserových bodů. Výsledky testu ukázaly, že výšky jednotlivých budov byly získány s vysokou přesností. Jediným nedostatkem zůstává nízká spolehlivost při určování typu střešního pláště. Byla však navržena zlepšení, které by měla tento nedostatek z velké části odstranit.

Abstract

In the theoretical part of the work current methods of 3D building model reconstruction from laser scanning data and aerial images were evaluated. In the practical part a new method utilizing information from both data sources and 2D ground maps was suggested. A model driven approach was selected. In the first part of the proposed method a type of a roof structure is determined. Canny edge detector was applied on aerial images and correlation with patterns of basic roof structures was calculated. In the second part altitude of the building is defined. 3D position of roof planes is computed from laser data using least-square adjustment. The highest edge from intersected roof planes determines overall altitude of a building. Tools from ArcView 9.2 and some functions created in Matlab 7.0.1 were applied to test the proposed method on real data from Brno and Sobotka.

The main contribution of this method is in almost completely automatic approach and a possibility to work with very sparse laser scanner point cloud. The altitudes of tested buildings were computed very precisely. The only shortage of proposed method is low reliability of a roof structure determination. Some improvements were proposed to reduce this drawback.

Obsah

1	ÚVOD	7
2	CÍLE PRÁCE	9
3	UVEDENÍ DO PROBLEMATIKY	11
3.1	REPREZENTACE MODELU BUDOV	11
3.2	KRITÉRIA HODNOCENÍ	13
4	REŠERŠE LITERATURY	15
4.1	MODELOVÁNÍ BUDOV Z DAT ALS	15
4.1.1	<i>Metody řízené daty</i>	<i>16</i>
4.1.2	<i>Metody řízené modelem.....</i>	<i>20</i>
4.2	LETECKÉ MĚŘICKÉ SNÍMKY	22
4.3	KOMBINACE ALS A LMS	25
4.4	METODY VYUŽÍVAJÍCÍ 2D GIS	27
5	PODKLADOVÁ DATA.....	29
5.1	DKM.....	29
5.2	BAREVNÁ ORTOFOTA	29
5.3	ALS	30
6	METODIKA	31
6.1	NÁVRH METODY MODELOVÁNÍ BUDOV	31
6.1.1	<i>Požadavky na tvorbu metody.....</i>	<i>31</i>
6.1.2	<i>Charakteristika metody</i>	<i>32</i>
6.1.3	<i>Postup práce.....</i>	<i>33</i>
6.2	ÚPRAVA DKM A BAREVNÝCH ORTOFOT	36
6.2.1	<i>Popis metod</i>	<i>36</i>
6.2.2	<i>Model builder</i>	<i>38</i>
6.3	URČENÍ TYPU STŘEŠNÍHO PLÁŠTĚ	40
6.3.1	<i>Detekce hran</i>	<i>40</i>
6.3.2	<i>Úprava hran</i>	<i>41</i>
6.3.3	<i>Určení polohy střechy</i>	<i>43</i>
6.3.4	<i>Určení tvaru střechy.....</i>	<i>43</i>

6.4	URČENÍ VÝŠKY BUDOVY	46
6.4.1	<i>Předzpracování laserových bodů</i>	46
6.4.2	<i>Zředění dat</i>	46
6.4.3	<i>Poloha střešní roviny v prostoru</i>	47
6.4.4	<i>Určení výšky střechy</i>	48
7	VÝSLEDKY	51
7.1	VÝSLEDKY URČENÍ TYPU STŘECHY	51
7.2	VÝSLEDKY URČENÍ NADMOŘSKÉ VÝŠKY	53
8	DISKUZE	55
8.1	ZHODNOCENÍ URČENÍ TYPU STŘECHY	55
8.2	ZHODNOCENÍ URČENÍ VÝŠKY BUDOVY	58
8.2.1	<i>Husté mračno laserových bodů</i>	58
8.2.2	<i>Řídké mračno laserových bodů</i>	60
8.2.3	<i>Požadovaná hustota laserových bodů</i>	61
8.3	MOŽNOSTI VYLEPŠENÍ	62
8.3.1	<i>Detekce hran</i>	62
8.3.2	<i>Obrazová korelace</i>	63
8.3.3	<i>Kontrola výšky rovinné střechy</i>	63
8.4	ZHODNOCENÍ METODY	64
8.4.1	<i>Splnění hodnotících kritérií</i>	64
8.4.2	<i>Využitelnost metody v praxi</i>	65
9	ZÁVĚR	66
10	POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE	68
10.1	LITERATURA	68
10.2	INTERNETOVÉ STRÁNKY:	72
	SEZNAM ZKRATEK	73
	SEZNAM OBRÁZKŮ	74
	SEZNAM TABULEK	75
	SEZNAM PŘÍLOH	76

1 Úvod

Tvorba 3D modelů zemského povrchu a objektů na něm patří v současnosti mezi nejdůležitější a nejrychleji se rozvíjející odvětví geoinformatiky. Zejména modelování budov našlo své uplatnění v řadě oborů lidské činnosti související s městskou zástavbou. Jedná se především o územní plánování. 3D model budov umožňuje analýzu dopadu hluku na budovy či optimalizaci umístění vysílacích stanic a jeho vizualizací je možné snadno posoudit vliv plánovaných staveb na okolí (HAALA, BRENNER, 1997). 3D modelů budov je ale možné využít i v oblasti památkové péče, cestovního ruchu nebo reklamy.

Nejčastější způsob získávání dat pro prostorové modely nabízí metody dálkového průzkumu Země (DPZ). Tradiční a stále rozšířenou metodou zůstává fotogrammetrie využívající stereodvojic leteckých snímků. Pouze s tímto datovým zdrojem je člověk schopen vytvořit velmi přesné modely viditelných budov. Bohužel kvůli značné komplexnosti leteckých snímků je automatizace celého procesu prakticky nemožná (HAALA, 1998b). Ačkoliv bylo výzkumu plně automatických metod věnováno nemalé úsilí a v mnoha případech bylo dosaženo značných pokroků, společnosti zabývající se tvorbou modelů z leteckých snímků stále závisí na manuálním zpracování dat (BRENNER, 2000; HOFMANN, 2005).

Druhou možností tvorby 3D modelů je využití mladší techniky leteckého laserového skenování (ALS). Velkou výhodou těchto dat je zejména přímá prostorová reprezentace snímaného zemského povrchu nebo objektů na něm (BRENNER, 2000). Díky tomu je možné jednotlivé kroky postupu snáze automatizovat a radikálně tak urychlit zpracování velkých objemů dat. Naproti tomu velkou nevýhodou laserového skenování zůstává, mimo jiné, nižší polohová přesnost výsledných modelů, zejména v případě malé hustoty naměřených bodů. Z tohoto důvodu se v současnosti stále častěji objevují nové metody využívající oba zmíněné postupy. Jejich kombinací se snaží v maximální možné míře využít jejich výhod a zároveň eliminovat jejich nedostatky. Pokud jsou k dispozici digitální pozemní plány budov, neváhá množství autorů využít i tento zdroj dat. Známé obrysy budov s dostatečnou přesností umožňují nejenom zlepšit polohovou přesnost výsledných modelů, ale navíc značnou měrou přispívají k automatizaci celého procesu.

Systémů využívajících jeden z uvedených přístupů, či jejich kombinace, existuje v současnosti celá řada. Společnosti zabývající se tvorbou 3D modelů budov vytváří poměrně přesné a detailní modely různorodých typů budov. Jen o malém množství z nich však lze říci, že by se být je přiblížily automatickému zpracování dat. V posledních letech byla sice vyvinuta řada metod pracujících zcela nebo alespoň z větší části automaticky. Tyto systémy

však pracují spolehlivě jen v určitých případech nebo mají specifické požadavky na vstupní data, typ modelovaných budov apod. (HOFMANN, 2005). Tvorba ideálního systému, který by splňoval vysoké požadavky automatizace, spolehlivosti a univerzálnosti použití a navíc vytvářel přesné a detailní modely, zůstává zatím neřešitelným problémem.

Pokud ideální systém vyhovující všem požadavkům neexistuje, je nutné vybrat metodu, která nejlépe vyhovuje daným potřebám a dostupnému typu dat. Výběrem vhodného řešení pro tvorbu 3D modelů budov se zabýval i Odbor správy ZABAGED ze Zeměměřického úřadu v Praze. Údaje o výšce budovy a tvaru střechy by se měly stát novými atributy budov digitální geografické databáze ZABAGED. Tato prostorová databáze zabírá celou oblast České republiky. Jedním ze základních požadavků na hledanou metodu byl tedy maximální možný stupeň automatizace hledané metody. Jakýkoliv manuální zásah pracovníků Odboru správy ZABAGED by radikálně zvýšil dobu potřebnou pro zpracování tak velkého množství dat. Jak již bylo zmíněno výše, je automatické zpracování stereodvojic leteckých snímků, které má Zeměměřický úřad k dispozici, velmi obtížné. U laserových dat by však bylo nutné nasnímat celé území České republiky. Při nízké letové hladině, která zajišťuje velmi husté mračno bodů, by byly ekonomické náklady neúměrně vysoké. Druhým požadavkem na hledanou metodu bylo tedy to, aby podávala dobré výsledky i při velmi řídkém mračnu bodů vstupních laserových dat.

Náplní této práce je návrh a tvorba nové metody pro tvorbu 3D modelů budov, která by splňovala oba výše zmíněné požadavky. Pro určení tvaru střech je ale malé množství bodů z laserového skenování nedostatečné. Proto navržená metoda využívá i dostupných leteckých měřických snímků a 2D obrysů budov z digitální katastrální mapy (DKM).

2 Cíle práce

Hlavní cíle diplomové práce jsou dva. Prvním z nich je zhodnocení existujících metod 3D modelování budov z dat ALS a leteckých měřických snímků. Kritériem pro hodnocení je zejména stupeň automatizace jednotlivých postupů. Dalšími sledovanými aspekty jsou pak univerzálnost a flexibilita systému, detailnost a přesnost generovaných modelů a v neposlední řadě i spolehlivost použité metody.

Druhým cílem, který tvoří jádro samotné práce, je navrhnout vlastní metodu 3D rekonstrukce budov. Tato metoda by měla v maximální možné míře splňovat požadavky Odboru správy ZABAGED na hledané řešení pro doplnění databáze ZABAGED (viz. kap. 1). Pro dosažení nejlepšího možného výsledku využívá navrhovaná metoda dat ALS, barevných ortofot, i 2D obrysů budov získaných z DKM. Výhodou tohoto postupu by mělo být téměř zcela automatické zpracování dat. Asistence lidského operátora bude vyžadována pouze pro kontrolu výsledků nebo v případě příliš složitého tvaru střešního pláště. Pořízení a zpracování hustého mračka bodů ALS, nutného pro automatické zpracování dat, je z ekonomického i časového hlediska velmi náročné. Metoda se proto zaměřuje na možnost určení tvaru střech a výšky budov i z řídkého mračka bodů ALS získaného z větší výšky letu používané např. pro letecké měřické snímkování.

Navrhovaná metoda se bude skládat z těchto dílčích kroků:

- Přesné vymezení polohy budovy v ortofotu pomocí dat DKM
- Zjištění tvaru střešního pláště pomocí detekce hran v obrazových datech
- Určení 3D polohy získaných střešních rovin pomocí dat ALS
- Určení výšky budovy (nejvyšší hrany) z polohy střešních rovin.

Tato metoda si neklade za cíl vymodelovat všechny typy střešních plášťů. Jedná se pouze o určení jednoduchých tvarů střech nacházejících se na většině budov v ČR. Modelování složitějších typů je i za ideálních podmínek značně obtížné a v případě automatického postupu a nízké hustoty vstupních dat zcela nemožné.

Jelikož je tato metoda vytvářena zejména pro doplnění dat do databáze ZABAGED, není výsledkem samotný model budovy, ale pouze informace o tvaru střešního pláště a nadmořské výšce vrcholové části střechy budovy. Na základě těchto informací a známého 2D obrysu budovy je ale následně možné jednoduchý model vytvořit. Vzhledem k náročnosti vytvoření

této metody není cílem práce hotová aplikace modelování budov, ale pouze podrobné metodické zpracování celého postupu. Zpracování testovacích dat probíhá zejména v programech ArcGIS a Matlab.

Závěrečným cílem práce je otestování výsledné metody na reálných datech a odhalení jejích nedostatků. Výsledky testování by také měly odpovědět na otázku, jaká minimální hustota bodového mračka ALS je nutná pro spolehlivé určení výšky budovy. Důležité je i zhodnocení, zda je navržená metoda využitelná v praxi, a navržení možných zlepšení.

3 Uvedení do problematiky

3.1 Reprezentace modelu budov

Při tvorbě nové metody modelování budov je důležité si odpovědět na otázku, jakou formu mají mít výsledná data. Vybraný model budovy určuje, jaká data potřebujeme, jak mají být uspořádána a uložena. WANG (2007, str. 7) definuje 3D model budovy jako „digitální prostorový počítačový model, který kombinuje geometrii a popisná data k popsání a reprezentaci budov v reálném světě“. Připravovaná metoda je pak na zvoleném datovém modelu do značné míry závislá.

Při návrhu modelu je důležité najít vhodný kompromis mezi univerzálností a jednoduchostí. Primitivní datový model do značné míry zjednodušuje práci omezením hodnot, které musíme zjistit. Také množství uložených dat je tak redukováno na minimum. Na druhou stranu jsou tyto modely omezeny na malé množství typů budov, které jsou schopny reprezentovat. „Ve snaze vypořádat se s velkým množstvím architektonických variací budov by měl být použití model obecný, jak jen je to možné“ (HAALA et al., 1998b, str. 342). Platí přitom, že použitá metoda může být univerzální jen do té míry, dokud to umožňuje výsledný datový model.

Základním a nejčastěji používaným typem je model Zobrazení hranic (Boundary Representation) a Model s pevnou geometrií (Constructive solid geometry). Důležitý, i když zřídka využívaný, je Parametrický model. Nově se objevuje i slibně vypadající Objektově orientovaný model budovy.

- **Zobrazení hranic (Boundary representation)**

Tento model je pravděpodobně nejrozšířenějším způsobem uložení dat. Nedefinuje tvar budovy přímo, ale popisuje jej souborem ploch, hran a rohů tvořících její hranice. Topologie je zajištěna uložením vztahů mezi jednotlivými částmi. Tento způsob reprezentace je relativně jednoduchý, snadno zobrazitelný a velmi univerzální. Jediným omezením je, aby byla budova tvořena rovnými plochami. Kupole a jiné zaoblené povrchy není možné tímto způsobem dostatečně přesně vyjádřit. (HAALA et al., 1998b; WANG, 2007)

Tento typ modelu využívá velké množství autorů, jako je například BRENNER (2000), HOFMANN (2005), SCHWALBE et al. (2005) atd.

- **Model s pevnou geometrií (Constructive solid geometry)**

Tento model je založen na předem definované sadě základních geometrických tvarů, jako jsou kvádry, válce, jehlany atd. S pomocí těchto primitiv je pak možné booleovskými operacemi (sjednocení, průnik, rozdíl) vytvořit komplexní tvar budovy. Tím je zároveň zajištěna i topologie modelu. Při definování dostatečného množství základních geometrických tvarů je tento model velmi univerzální. Na rozdíl od metody Zobrazení hranic je možné (do určité míry) modelovat i zakřivené plochy. Tvorba a následná vizualizace tohoto modelu jsou však obtížnější. (HAALA et al., 1998b; WANG, 2007)

Model s pevnou geometrií využívá například HAALA et al. (1998a; 1998b) nebo GÜLCH et al. (1999).

- **Parametrický model**

Součástí Parametrického modelu není soubor ploch nebo objektů, které by bylo možné okamžitě zobrazit v některém grafickém softwaru, ale sada parametrů budovy, ze kterých je později možné model vytvořit. Pro klasickou sedlovou střechu se štítem a čtyřúhelníkovým pozemním plánem je to například: pozice, délka, šířka, orientace, výška, orientace sedla a sklon střechy. Podobným způsobem je možné vytvořit sadu parametrů a modelovat jednotlivé střešní vikýře. Tento způsob vyjádření je výhodný zejména u jednoduchých tvarů budov, které mohou být popsány několika málo hodnotami bez nutnosti ukládání velkého množství dat. Nevýhodou je naopak minimální univerzálnost. Pro každý typ střechy je nutné definovat vlastní sadu parametrů. Složitě a komplexní budovy pak není možné tímto způsobem vyjádřit vůbec (MAAS, 1999a; WANG, 2007).

Parametrický model používá ve své práci MAAS (1999a; 1999b).

- **Objektově orientovaný model**

Parametrický model a Model s pevnou geometrií reprezentují pouze geometrii objektu, ale neobsahují významové informace. Model Zobrazení hranic zase není schopen zobrazit zaoblené plochy. WANG (2007) ve své práci představuje nový způsob reprezentace budov, který by měl řešit nedostatky předchozích modelů. Budova samotná je objektem, který se skládá z dalších objektů: střechy, stěn a podlahy. Střecha se dále dělí na jednotlivé střešní plochy (taktéž objekty), složitou budovu je

možné rozložit na základní typy budov apod. Každá z těchto součástí pak obsahuje příslušné atributy (např. typ střechy, materiál...) a vztahy k ostatním objektům.

Výhodou takového složení je, že lze s budovou pracovat jako s celkem, i po částech. Na rozdíl od ostatních modelů budovy obsahuje kromě geometrické reprezentace i sématickou (významovou) informaci. Kromě vztahů mezi částmi budovy má definované i vztahy mezi samotnými budovami. A oproti Modelu s pevnou geometrií či Parametrickému modelu není limitován předem nastavenými tvary budov.

3.2 Kritéria hodnocení

Aby bylo možné zhodnotit a srovnat dostupné metody, je nutné v první řadě stanovit kritéria hodnocení. HOFMANN (2005) shrnuje pět kritérií, která by měl splňovat dobrý, v praxi využitelný systém:

- **Univerzálnost**

Toto kritérium zahrnuje schopnost systému modelovat budovy s různě složitým střešním pláštěm. Značná část, zejména automatických, metod je schopna generovat pouze modely, které mají některý ze základních typů střech. Většina zbylých metod je pak alespoň částečně omezena některými podmínkami. Velmi častý je například požadavek, aby se budova skládala výhradně z rovinných ploch. V ideálním případě by měl být systém schopen rekonstruovat maximální možné množství typů budov a případné selhání oznámit operátorovi.

- **Flexibilita**

Určuje přizpůsobivost systému různému typu vstupních dat. Ideální systém by měl umět pracovat s různou hustotou a typem bodů ALS (resp. s různou kvalitou leteckých snímků). Přínosem je možnost zahrnutí pozemních plánů budov, pokud jsou k dispozici apod.

- **Detailnost**

Podrobnost výsledných modelů je závislá zejména na hustotě (prostorovém rozlišení) vstupních dat. Modelovat drobné střešní tvary při nízké hustotě bodů je zkrátka nemožné. Nemělo by se však stát, aby metoda nedokázala vygenerovat např. vikýř na střeše i při dostatečné hustotě dat. Detailnost určuje nejmenší velikost střešního tvaru, kterou je systém schopen pro danou hustotu bodů ALS vygenerovat.

- **Přesnost a spolehlivost**

Podobně jako detailnost závisí tato kritéria především na přesnosti a hustotě vstupních dat. Výsledný model by měl, v rámci možností, co nejpřesněji odpovídat skutečnému objektu v reálném světě. V případě selhání by měl systém oznámit chybu operátorovi, aby rozhodl o dalším postupu.

- **Doba výpočtu**

Přestože je zmíněna až na konci, patří výpočetní doba k nejdůležitějším kritériím hodnocení metod. Hlavní otázkou zůstává, zda algoritmus pracuje zcela automaticky, poloautomaticky (v tom případě velmi závisí na stupni automatizace), nebo je vyžadováno manuální zpracování uživatelem. Hledání zcela (resp. téměř) automatické metody tvorby 3D modelů budov je v současné době věnováno nemalé úsilí.

4 Rešerše literatury

Přestože metoda 3D rekonstrukce budov pomocí dat ALS je stále ještě poměrně mladá, zabývá se touto tematikou velké množství odborných článků a vědeckých prací. Tato vysoká pozornost dokazuje nebývalý zájem o možnosti využití této techniky.

Obsahem literární rešerše je analýza existujících metod, které rekonstruují modely budov z dat ALS, leteckých měřických snímků nebo kombinací více datových zdrojů. Uvedené postupy jsou v rámci možností zhodnoceny podle kritérií uvedených v kapitole 3.2. Kapitola 4.1 se zabývá hodnocením metod, využívajících jako datového zdroje bodů ALS a kap. 4.2 metodami pracujícími s leteckými snímky. Kap. 4.3 diskutuje možnosti kombinace obou datových zdrojů a v kap. 4.4 jsou zmíněny možnosti využití 2D plánů budov.

4.1 Modelování budov z dat ALS

Tato kapitola popisuje a hodnotí nejdůležitější existující metody vytváření prostorových modelů budov z dat ALS. Ve většině případů se jedná pouze o prezentaci postupu aplikovaného na ukázková data než o metody využívané v praxi. Podle způsobu práce s laserovými daty lze tyto metody rozdělit do dvou kategorií:

- **Metody řízené modelem (Model-driven)**

Metody řízené modelem využívají k rekonstrukci budov předem připravených jednoduchých modelů. Tyto umělé střešní tvary se pak snaží přizpůsobit laserovým datům (PIKHARTOVÁ, 2007; SCHWALBE et al., 2005). Nevýhodou těchto metod je jejich nízká univerzálnost, neboť generované střešní tvary jsou limitovány sadou předem připravených modelů. Na druhou stranu bývají většinou relativně jednoduché a nevyžadují tak husté mračno bodů jako metody řízené daty.

Tyto metody pracují velmi dobře u jednoduchých střešních tvarů, avšak příliš složité tvary není možné generovat vůbec. V případě komplexů budov je nutné nejprve provést segmentaci do základních elementů, které se vymodelují zvlášť a poté se opět spojí (HOFMANN, 2005).

- **Metody řízené daty (Data-driven)**

Na rozdíl od metod řízených modelem získávají tyto metody informace přímo z dat ALS. V mračnu laserových bodů se snaží najít střešní roviny, které pak spojují do modelů budov (HOFMANN, 2005; SCHWALBE et al., 2005).

Hlavní výhodou těchto metod je velmi vysoká univerzálnost výsledných modelů. Na druhou stranu vyžadují většinou mnohem hustější mračno laserových bodů, doba výpočtu je delší a jsou citlivější na chyby v laserových datech (HOFMANN, 2005).

Zdá se, že v současné době se stále více autorů kloní spíše k metodám řízeným daty. Hustota bodů získaných z laserového skenování neustále stoupá, takže je možné získávat stále větší množství informací přímo ze surových dat (VOSSELMAN, 1999). K metodě přímého modelování budov se kloní i HOFMANN (2005). Zároveň však přiznává, že v případě složitých střešních plášťů není možné pomocí daty řízené metody spolehlivě najít a propojit všechny střešní roviny ani v případě velmi hustého mračna vstupních bodů.

Představené metody jsou rozříděné podle svých autorů a srovnané v chronologickém pořadí:

4.1.1 Metody řízené daty

HAALA, BRENNER

Tato metoda nabízí poměrně zajímavý postup využívající povrchových normál digitálního modelu povrchu (DMP) a skeletonizace hranic budovy získaných z pozemního plánu (HAALA, BRENNER, 1997). Pro tvorbu DMP je využito hustého mračna bodů ALS. Pro každý bod vzniklé pravidelné mřížky je vypočítána povrchová normála. Tyto body jsou poté segmentovány do shluků na základě orientace povrchových normál ke stěnám budovy získaných z vrstvy půdorysu budov GIS. Vzniklé shluky vcelku detailně určují jednotlivé střešní roviny. Problematickým místem tohoto přístupu je přesné určení hran střechy. Aby toho bylo možné dosáhnout, je provedena skeletonizace plánu budovy.

Pomocí skeletonizace je možné určit nejpravděpodobnější tvar střešního pláště. Tento přístup ovšem předpokládá, že z každé stěny budovy vychází střešní rovina, což nemusí být vždy pravda. (Například u sedlové střechy se štítem vychází střešní rovina pouze ze dvou a ne ze čtyř stěn.) Proto se následným testováním zjišťuje, zda orientace takto vzniklých střešních rovin odpovídá orientaci povrchových normál, které jí náleží. Pokud ne, je tato střešní rovina odstraněna. Nakonec je proveden výpočet 3D polohy zbývajících střešních rovin z hodnot bodů ALS.

Výhodou této metody je téměř úplná automatizace celého procesu. Operátor asistuje pouze v případě, kdy automatický algoritmus pravděpodobně selhal. Druhou výhodou je, že díky využití pozemních plánů stačí i relativně nízká hustota laserových bodů. Nevýhodou je

naopak nízká detailnost výsledných modelů. Se snižující se hustotou laserových bodů navíc rychle klesá i spolehlivost celé metody.

BRENNER

Jednu z metod stojící na pomezí mezi přístupem řízeným daty a modelem navrhuje i BRENNER (2000). Kromě samotných dat ALS využívá i obrysy budov z digitálních pozemních plánů. V prvním kroku se snaží zrekonstruovat nejpravděpodobnější tvar střešního pláště pomocí skeletonizace obrysu budovy. Tento postup je výhodný v případě, kdy hustota a přesnost laserových bodů není příliš vysoká. Určování tvaru střešního pláště výhradně z pozemního plánu však s sebou nese i řadu nevýhod a problémů. Generovaná budova musí být v první řadě kompaktní (bez vnitřních polygonů v pozemním plánu). Dále navržený postup předpokládá stejný sklon všech střešních rovin a stejnou výšku všech stěn. Není také možné rekonstruovat například střešní vikýře, které nejsou na 2D plánu budovy patrné. Příliš složité obrysy budovy navíc vedou k nespolehlivé rekonstrukci výsledného střešního pláště. Tyto nedostatky jsou dalším postupem z velké části odstraněny. V druhém kroku se provede (nezávisle na předchozí skeletonizaci) segmentace bodů ALS do střešních rovin. Následně jsou tyto roviny získané oběma přístupy překryty a je vybrán nejpravděpodobnější tvar střešního pláště.

Tento postup je až na drobné detaily velmi podobný metodě prezentované výše (HAALA, BRENNER, 1997). Obě metody mají společný vysoký stupeň automatizace (i v tomto případě je operátor nutný pouze pro kontrolu a případnou opravu chybných modelů) a nízký stupeň detailnosti. Tato novější metoda nevyžaduje tak husté mračno vstupních bodů ALS. Naproti tomu její spolehlivost u složitých střešních tvarů je ještě nižší.

VOSELMAN et al.

Daty řízenou metodu využívající upravenou Houghovu transformaci a segmentaci bodů pomocí pozemních plánů budov představuje Vosselman (VOSELMAN, 1999; VOSELMAN, DIJKMAN, 2001; VOSELMAN, SUVEG, 2001).

Husté mračno surových laserových bodů bohužel ze své podstaty obsahuje velké množství šumu. Pokud jsou body získány z většího množství přeletů, bývá situace ještě horší. Proto pokud je k určení polohy střešních rovin použito povrchových normál DMP, které využívá například HAALA, BRENNER (1997), bývají výsledky často nespolehlivé (VOSELMAN, 1999). Autory navrhovaná metoda proto využívá Houghovy transformace upravené do prostoru. Kvůli spolehlivějšímu nalezení střešních rovin u složitějších tvarů budov je využita

segmentace pozemního plánu do jednodušších tvarů, a to přesto že se jedná o datově založený přístup.

Houghova transformace bohužel nezjistí, zda se mezi body ležícími v jedné rovině nevyskytují velké mezery a zda tedy tvoří souvislou střešní rovinu. Proto je k samotnému určení pozice střešních rovin využito Delaunayovy triangulace. Každý trojúhelník výsledné sítě je součástí střešní roviny, pokud se všechny jeho vrcholové body nachází do určité vzdálenosti od roviny a zároveň tvoří souvislou plochu s ostatními trojúhelníky. Hrany pláště se určí snadno průnikem střešních rovin, okraje střechy průnikem se stěnami budov získanými z pozemních plánů.

Nevýhodou této metody je nutnost velmi hustého mračna laserových bodů. Samotná Houghova transformace vyžaduje ke spolehlivým výsledkům velké množství bodů. Navíc při počáteční segmentaci je často střešní rovina rozdělena na více částí a tím je počet bodů ještě snížen. Na druhou stranu při dostatečném množství dat podává metoda i při automatickém zpracování spolehlivé výsledky i u složitějších tvarů střešního pláště.

HOFMANN

HOFMANN (2005) se snaží ve své disertační práci najít systém, který by nevyužíval jiné zdroje než mračna laserových bodů a nebyl zaměřený jen na úzce specifikovaný úkol, tedy aby byl všestranně a prakticky využitelný. Rovněž shrnuje základní kritéria (podrobně popsána v kap. 3.2), která by takový systém měl splňovat. Metoda která by podle autora tato kritéria splňovala musí být založena na datovém přístupu (řízená daty). Jedině tak je totiž možné vytvořit dostatečně univerzální a detailní modely budov, které by uživatel mohl vyžadovat. „Aplikovat modelem řízený přístup na složitější komplexy budov by navíc vyžadovalo rozdělení střešní struktury do jednoduchých segmentů, jako je například sedlová či valbová střecha. Dokonce i s využitím pozemních plánů budov to je extrémně náročný úkol.“ (HOFMANN, 2005, s. 18)

V autorem navrhované metodě se nejprve ze surových laserových dat vytvoří digitální model povrchu ve formě TIN. Pro každý vytvořený trojúhelník jsou vypočítány potřebné parametry (sklon, orientace a vzdálenost od středu), podle nichž se provede klasifikace do tříd. Pokud se mezi sloučenými ploškami nevyskytuje velká mezera, vytváří spolu střešní rovinu. Hrany pláště se získají protnutím sousedních rovin.

Výsledný systém je velmi univerzální, detailní, téměř zcela automatický a do značné míry i flexibilní. Vyžaduje sice husté mračno laserových bodů, což je ale vzhledem k ostatním kvalitám metody pochopitelné. Bohužel i zde praxe ukázala, že při větším množství střešních

rovin (komplexy budov, střešní vikýře...) nejsou výsledky metody příliš spolehlivé. V tomto případě totiž není možné od sebe jednotlivé roviny při shlukování jednoduše odlišit.

SCHWALBE et al.

SCHWALBE et al. (2005) prezentuje poměrně novou a inovativní metodu využívající hustého mračka laserových bodů, a pokud jsou dostupné, pozemních plánů budov. V první části celého postupu jsou vybrány laserové body náležející jedné budově. Pokud je to možné, využívá metoda existujících plánů. Pokud ne, provede metoda segmentaci na základě výšky bodů a rozdílu prvního a posledního pulsu. V druhé části je určena orientace budovy na základě převládajícího směru bodů ležících ve vodorovných liniích. Také v tomto případě je možné práci značně ulehčit využitím pozemního plánu budovy. Při samotné rekonstrukci budov se metoda nechává inspirovat intuitivním postupem uživatele pracujícího s prostorovou projekcí mračka bodů ALS. Algoritmus postupně natáčí mračno bodů do různých projekcí (rovnoběžných či kolmých na orientaci budovy) tak, aby se body ležící v jedné střešní rovině zobrazily jako úsečka. Následným postupem jsou vybrány body ležící v této úsečce, z nichž jsou poté generovány samotné střešní roviny. Gradient a délka úsečky určují sklon a šířku plochy, průsečíky úseček hrany střešního pláště. Spojením jednotlivých rovin vznikne výsledný model budovy.

Hlavní výhodou tohoto přístupu je jeho plná automatizace. Protože se navíc jedná o metodu řízenou daty, jsou výsledné modely velmi univerzální a detailní. Přínosná je také možnost, ale nikoliv nutnost, využití plánů budovy pro segmentaci bodů a snazší určení orientace a hranic budovy. Jedinou nevýhodou tak zůstává nutnost velmi hustého mračka laserových bodů.

Původní článek který napsal SCHWALBE et al. (2005) je velmi stručný, celý postup popisuje pouze teoreticky a některé dílčí kroky jsou pouze zmíněny. PIKHARTOVÁ (2007) ve své práci představuje hotový funkční algoritmus vycházející z této metody. Podrobně popisuje jednotlivé kroky postupu, včetně problematických míst, nedostatků a možností zlepšení.

WANG

Revoluční přístup představuje ve své práci WANG (2007). Hlavním přínosem jeho metody je využití objektivě orientovaného modelu budovy pro uložení výsledných dat (viz kap. 3.1). Jako základního datového zdroje využívá dat ALS i LMS (letecké měřické snímky).

Celý model budovy je v podstatě určován modelem střešního pláště a ten je zas definován svými hranami a okraji. Celý postup je proto zaměřen na přesné určení hran a okrajů střechy

budovy. Hrany střechy jsou získány protínáním střešních rovin vygenerovaných z dat ALS. Určit přesnou polohu okrajů střechy je trochu obtížnější. Pro dosažení maximální možné přesnosti byla zvolena kombinace obou zdrojů dat. 2D poloha okrajů střechy je určena z hran detekovaných z LMS. Jejich výška je poté určena z rovin generovaných z dat ALS. Automatické postupy detekce hran nemusí vždy podávat uspokojivé výsledky. Hledání hran na leteckém snímku je často komplikováno stíny, nízkým kontrastem, nízkým prostorovým rozlišením nebo složitým tvarem samotné budovy. V případě že automatický postup selže, má uživatel možnost vybrat poloautomatický nebo plně interaktivní postup detekování hran na leteckém snímku.

Díky využití výhod leteckých měřických snímků i laserových bodů je dosaženo maximální možné polohové i výškové přesnosti. V otázce spolehlivosti a míře automatizace bylo zvoleno kompromisní řešení. Jednoduché tvary budov jsou modelovány automaticky. V případě selhání automatického postupu je vyžadován interaktivní zásah uživatele. Díky tomu, že je metoda řízena daty i díky využití objektově orientovaného přístupu jsou výsledné modely velmi univerzální. Jediným omezením je požadavek na budovy skládající se výhradně z rovných ploch.

4.1.2 Metody řízené modelem

HAALA et al.

Metody řízené modelem bývají kvůli své nižší univerzálnosti méně využívané než metody řízené daty. Přesto můžeme najít několik zajímavých prací zabývajících se tímto přístupem. Jednou z nich je metoda Norberta Haaly a Clause Brennera (HAALA et al., 1998a; HAALA et al., 1998b; HAALA, BRENNER, 1998; HAALA, BRENNER, 1999), využívající laserových bodů, multispektrálních leteckých snímků i digitálních pozemních plánů. Metoda samotná se skládá ze dvou hlavních částí. V první části je provedena klasifikace bodů ALS s využitím multispektrálních leteckých snímků. V druhé části se autoři zabývají samotným vytvářením 3D modelů budov z dat ALS a digitálních plánů budov. Při vytváření prostorového modelu je nejprve pozemní plán rozdělen na čtyřúhelníkové segmenty. Pro každý segment jsou poté vybrány příslušné body laserového skenování. Na DMP vytvořený z těchto bodů se potom algoritmus pomocí MNČ (metoda nejmenších čtverců) snaží umístit předem připravené, nejčastěji se vyskytující, typy střech (plochá, sedlová se štítem, sedlová s valbou atd.). Po určení typu střechy je vypočítána i výška a sklon střešních rovin jednotlivých segmentů.

Hlavní výhodou této metody je její plná automatizace. Navíc díky tomu, že využívá známých obrysů budov a typ střechy je určován výběrem z předem připravených modelů, je možné modelovat budovy i při relativně nízké hustotě laserových bodů. Bohužel v případě složitějšího tvaru budovy o tuto výhodu přijdeme. Jednotlivé čtyřúhelníkové segmenty, na které se plán budovy rozpadne, jsou totiž příliš malé a potřebě hustého mráčka bodů ALS se přesto nevyhneme. Nevýhodou této metody řízené modelem je nízká univerzálnost, protože není v silách autorů dopředu odhadnout všechny myslitelné typy střech, které by se mohly na budovách vyskytnout. Kvůli využití pozemních plánů budovy navíc není možné generovat střešní tvary (vikýře, věžičky apod.), které nejsou v těchto plánech patrné.

Pro zvýšení detailnosti výsledných modelů má uživatel možnost využít grafické uživatelské prostředí pro interaktivní vložení nového segmentu budovy, pro který bude zvlášť provedeno hledání střešního pláště (HAALA, BRENNER, 1998). Na druhou stranu tím metoda přichází o svou hlavní výhodu plné automatizace.

MAAS, VOSELMAN

Další postup řízený modelem prezentují například Maas a Vosselman (MAAS, 1999a; MAAS, 1999b; MAAS, VOSELMAN, 1999). Metoda pracuje se surovými daty ALS, které využívá jak k segmentaci budov, tak k jejich následnému modelování. Pro detekci budov využívají klasifikace DMP. Ze samotných výškových dat lze relativně jednoduše vyčlenit budovy a stromy. Po aplikování Laplaceova filtru pro detekci hran pak bylo možné odlišit stromy (kde dochází k rychlému střídání výškových hodnot) od relativně neměnných výšek střech. Výsledkem této klasifikace jsou oddělená mráčka bodů odpovídající jednotlivým budovám. Pokud jsou dostupné pozemní plány budov v dostatečné kvalitě, je možné je využít pro zajištění větší přesnosti či slučitelnosti s jiným datovým zdrojem (MAAS, VOSELMAN, 1999).

Jako výstup celého postupu je použit parametrický model budovy. Výstupem metody tedy není soubor ploch nebo objektů, které by bylo možné okamžitě zobrazit v některém grafickém softwaru. Ale sada parametrů budovy, ze kterých je později možné model vytvořit. Pro klasickou sedlovou střechu se štítem a čtyřúhelníkovým pozemním plánem je to například: pozice, délka, šířka, orientace, výška, orientace sedla a sklon střechy. Pro získání těchto hodnot je využito neměnných momentů prvního a druhého řádu, ze kterých je možné parametry jednoduchých modelů budov vypočítat.

V případě, že má budova jiný než čtyřúhelníkový pozemní plán, je nutné provést segmentaci do těchto primitiv. Touto problematikou se však už autoři nezabývají. Navíc tato

metoda dokáže modelovat pouze základní střešní tvary jako je sedlová a plochá střecha. Pro zjištění většího množství parametrů (u komplexnějších tvarů střešního pláště) by bylo zapotřebí neměnných momentů třetího a čtvrtého řádu. S vyšším řádem však stoupá i množství šumu, který má za následek nižší spolehlivost celé metody. Kromě samotného modelu budovy mohou být (při dostatečné hustotě mračna laserových bodů) vypočteny i modely vikýřů definované čtyřmi parametry. Metoda bohužel opět předpokládá jen značně zjednodušený tvar vikýřů s neměnnou výškou a orientací kolmou na sedlo střechy.

Výhodou této metody je opět její plná automatizace. Navíc nevyžaduje žádná doplňková data jako letecké snímky nebo 2D plány budov. Velkou nevýhodou je naopak minimální univerzálnost. Algoritmus modeluje pouze budovy s čtyřúhelníkovým půdorysem a základní tvary střešního pláště. Při vysoké hustotě bodů je možné modelovat vikýře, ale opět pouze předem nastavených tvarů. Pro některé účely by mohlo být výhodné použití výsledného parametrického modelu.

4.2 Letecké měřické snímky

Kvůli velkému množství komplexních informací obsažených v leteckých snímcích je proces automatizace tvorby prostorových modelů z tohoto datového zdroje velmi obtížný (HAALA et al., 1998b). Přesto se ale objevilo několik prací představujících poloautomatické či zcela automatické postupy využívající výhradně leteckých snímků, případně v kombinaci s digitálními obrysy budovy. Tyto systémy však pracují spolehlivě jen v určitých případech nebo mají specifické požadavky na vstupní data, typ modelovaných budov apod. Společnosti zabývající se tvorbou modelů z leteckých snímků tak stále závisí na manuálním zpracování dat (HOFMANN, 2005). Přesto je zde několik prací zabývajících se touto tematikou zmíněno.

GÜLCH et al.

GÜLCH et al. (1999) představuje možnost částečné automatizace klasických fotogrammetrických metod modelování budov. V případě sedlové střechy musel uživatel v původním postupu na snímku nejdříve manuálně označit šest rohových bodů a jeden bod na zemi. V autory navrhované metodě uživatel v prvním kroku vybere z předpřipravených drátěných modelů typ budovy. Zadáním dvou bodů je určena pozice, třetím bodem je zjištěna výška budovy. Počet kroků je tak v případě sedlové střechy snížen ze sedmi na čtyři. Nevýhodou je, že je tímto způsobem možné modelovat pouze přednastavené typy budov a je nutné dodržet pořadí zadávaných bodů.

VOSSELMAN, SUVEG

Jiný přístup řízený modelem, který využívá rovněž digitální obrys budovy představuje VOSSELMAN, SUVEG (2001). Pokud je tvar pozemního plánu budovy složitější, provede se jeho segmentace. Následný postup se aplikuje na všechny možné kombinace rozdělení plánu, které připadají v úvahu a teprve v závěru metody se vybere nejpravděpodobnější tvar budovy. V každé segmentované části jsou detekované hrany srovnány se vzory třech uvažovaných modelů. Se sedlovou střechou s různou orientací sedla a rovinnou střechou. Spojením jednotlivých částí vznikne jeden z potenciálních tvarů celé budovy. Pro nalezení konečného výsledku se použije opět korelace detekovaných hran tentokrát se vzorem celého modelu budovy.

Výhodou tohoto přístupu je na rozdíl od předchozí metody úplná automatizace postupu. Stejně jako jiné modelem řízené přístupy podává dobré výsledky u jednoduchých střešních tvarů. Nedokáže však modelovat tvary, které neodpovídají předpřipraveným typům budov. U složitějších komplexů pak vzniká velké množství hypotetických způsobů segmentace, které není možné v reálném čase ověřit.

MOONS et al.

Komplexní postup řízený daty navrhuje MOONS et al. (1998). Podmínkou úspěšného modelování budovy je velmi vysoké prostorové rozlišení snímků a viditelnost budovy na třech překrytových zónách. Pomocí svazkového vyrovnání hran nalezených na jednotlivých snímcích nejprve vytvoří nepřesný model, který je dalším postupem upraven tak, aby přesně kopíroval tvar střešního pláště.

V první části je provedena na jednotlivých snímcích detekce hran pomocí Cannyho operátoru. Doplněním liniových segmentů je vytvořena nepravidelná trojúhelníková síť TIN. Protože střechy budovy bývají většinou vytvořeny ze stejného materiálu, je oblast střešního pláště vymezena výběrem trojúhelníků s přibližně stejným barevným odstínem. Výběr trojúhelníku s nímž se ostatní srovnávají je prováděn pro každou budovu manuálně. Z detekovaných hran jsou poté vybrány linie ležící uvnitř této plochy. Pomocí metody vyrovnání paprskových svazků jsou nalezeny shodné linie ve třech snímcích a vytvořen 3D model střešních hran.

Ve druhé části probíhá hledání polygonů střešních rovin. V iteračním postupu jsou nejdříve vybrány dvě nejdelší linie. Pokud jejich ortogonální vzdálenost nepřesahuje prahovou hodnotu, je pomocí metody nejmenších čtverců vypočítána rovnice roviny procházející hranami. Následně jsou ze seznamu vybrány všechny linie, které leží do určité vzdálenosti od

roviny a její pozice je s využitím těchto hran upřesněna. Proces je opakován dokud existují nevyužité a nevyzkoušené linie. Pomocí linií, podle nichž byla určena poloha roviny jsou zjištěny i okraje polygonu. Pokud se hrany dvou sousedních polygonů nachází do určité prahové vzdálenosti, jsou polygony propojeny a sousední hrany nahrazeny průsečnicí. Polygony, které nemohly být připojeny k jinému jsou odstraněny.

Při hledání střešních rovin a jejich následném spojování se nehledí na metrickou přesnost modelu, ale pouze na jeho topologickou správnost. V posledním kroku se proto drátěný model pláště zobrazí zpět na letecké snímky. Koncové body jednotlivých hran se posunují o určitou malou vzdálenost, dokud není nalezeno místo, kde se hrany shodují s nejvyššími hodnotami kontrastu na snímku.

Výhodou této metody je téměř úplná automatizace, univerzálnost a nutnost využití pouze jednoho datového zdroje. Metoda prozatím nebyla vyzkoušena na složitých střešních tvarech obsahujících vikýře apod., avšak podle autorů podává velmi slibné výsledky. Vstupní podmínkou jsou ovšem letecké měřické snímky s velmi vysokým prostorovým rozlišením.

FLAMANC et al.

FLAMANC et al. (2003, s. 53) dochází ve své práci k závěru, že „modelování budov městských oblastí je tak komplexním problémem, že je beznadějné hledat univerzální řešení, které by efektivně rekonstruovalo všechny budovy od jednoduchých sedlových střeš po katedrály“. Autoři se proto snaží zkombinovat více postupů s různým stupněm automatizace pro různě složité typy budov. Ve většině případů se jedná jen o obecný přístup k problému nebo metodu prezentovanou jinými autory. Jako datového zdroje využívá letecké snímky, 2D obrysy budov a DMP (vytvořený z leteckého snímkování nebo laserových dat).

Automatický postup řízený modelem:

Tento postup je podobný metodě, kterou navrhuje BRENNER (2000). Na základě 2D obrysu budovy se určí několik nejpravděpodobnějších tvarů střešního pláště. Porovnáním s DMP je vybrán model s nejmenšími rozdíly ve výšce. Tímto přístupem bohužel nejde modelovat střešní tvary, které nejsou patrné z obrysu budovy a u složitějších tvarů pláště vykazuje metoda nízkou spolehlivost.. U základních typů budov, pro něž je toto řešení určeno, však pracuje automaticky a spolehlivě.

Automatický postup řízený daty:

Tento přístup je určen pro složitější střešní tvary, které však stále neobsahují příliš velké množství střešních rovin. Podobný přístup využívá například VOSSELMAN (1999). Pomocí upravené Houghovy transformace se nejprve provede detekce střešních rovin. Výsledkem je

velké množství potenciálních rovin, které ne vždy skutečně existují. V závěru postupu se proto provede porovnání s DMP a překrývající se plochy, které leží nejdále od něj, jsou odstraněny. Pokud neobsahuje budova velké množství střešních objektů nebo se nejedná o složitý komplex budov, podává tento automatický postup opět velmi spolehlivé výsledky.

Poloautomatický postup

V různých oblastech světa se objevují různé charakteristické typy zástavby. Snažit se přijít na metodu spolehlivě modelující všechny druhy budov by bylo podle autorů ztrátou času. Pro budovy, které není možné vymodelovat ani jedním z předchozích postupů proto navrhuje speciální nástroje vytvořené přímo pro určitý typ zástavby. Jako příklad uvádí město Amiens ve Francii s typicky městskou zástavbou bloků na sebe navazujících budov se sedlovou střechou. V navrhovaném postupu uživatel pouze označí rohy centrálního hřebenu. Z DMP je potom automaticky určen sklon střešních rovin a z leteckých snímků okraj budov.

Hlavní nevýhodou systému je podle autorů nutnost manuálně zadat pro každou oblast způsob tvorby 3D modelu. Do budoucna by měla být tato část postupu rovněž zautomatizována.

4.3 Kombinace ALS a LMS

Letecké měřické snímky a body laserového skenování jsou dva základní zdroje dat pro tvorbu 3D modelů budov. Každý z nich s sebou nese výhody, ale i nedostatky plynoucí ze způsobu získávání těchto dat.

Hodnocením obou datových zdrojů se zabývá například BRENNER (2000), MAAS (1999a, 1999b, 2001), nebo MAILLET, FLAMANC (2004). Důležitou srovnávací studii provedl KAARTINEN et al. (2005). Ve své práci posuzuje datové zdroje z hlediska náročnosti jejich zpracování a přesnosti výsledného modelu. Testování se zúčastnilo 11 účastníků. Každý z nich měl navrhnout metodu a zpracovat dostupná snímková či laserová data (případně zkombinovat oba zdroje) a vytvořit 3D model města. Z výsledků experimentu vyplynulo, že data ALS jsou přesnější při určování výšek a určování polohy střešních rovin a hran. Zatímco letecké snímky dávají lepší výsledky při určování okrajů střech a délek budovy. Náročnost zpracování dat závisí zejména na stupni automatizace. Obecně platí, že laserová data umožňují vyšší stupeň automatizace. Oproti tomu při manuálním zpracování leteckých snímků je uživatel schopen najít a vymodelovat větší množství detailů, jako jsou například vikýře apod.

Je přitom zajímavé sledovat, že se jednotlivé klady a zápory těchto dat vhodně doplňují. Přímá reprezentace povrchu laserovými daty je výhodná pro hledání ploch nebo sledování

drsnosti povrchu. Naopak nespojitost mračna bodů je činí zcela nevhodné pro hledání hran, zlomových linií apod. K tomuto účelu se nejlépe hodí spojitá data leteckého snímku (SCHENG, CSATHÓ, 2002). Výhody plynoucí ze spojení obou typů dat zdůrazňuje i WANG (2007). Jejich kombinací je možné odstranit nedostatky a využít výhody obou datových zdrojů.

HAALA et al.

Způsobů integrace existuje velké množství. HAALA et al. (HAALA et al., 1998b; HAALA, BRENNER, 1999) využívá letecké snímky výhradně ke klasifikaci laserových bodů náležejících budovám, stromům a zemskému povrchu (zahrnujícím trávu i ulice). Klasifikace využívající jako jediný datový zdroj letecký snímek nepřinesla dobré výsledky. Nebylo možné spolehlivě odlišit travní porosty od stromů a střechy budov od ulic. Využitím DMP získaného z dat ALS zase není možné jednoznačně oddělit střechy budov od stromové vegetace. Kombinací obou datových zdrojů bylo v tomto případě dosaženo nejlepších výsledků.

HUBER et al.

Další autoři využívají možností leteckých snímků více. HUBER et al. (2003) potřebuje obrazová data k nalezení budov i pro přesné určení jejich okrajů. Ve své metodě nejprve převede surová laserová data na pravidelnou mřížku. Na vzniklý laserový a snímkový obraz jsou poté aplikovány další algoritmy pro určení různých objektů na Zemi. Detekce homogenních oblastí pro nalezení střešních rovin a detekce hran pro nalezení okrajů budov. Hrany nalezené na obou obrazech jsou vzájemně porovnány. Jedině tak je možné spolehlivě určit, zda se jedná o skutečné prostorové zlomy, nebo zda jde pouze o různé odstíny šedi na leteckém snímku či členitý terén v laserových datech. Nalezené hrany jsou zobrazeny na DMP ve formě TIN vytvořený z dat ALS. Pro každou uzavřenou oblast se poté provede shlukování jednotlivých trojúhelníků podle polohy a orientace. Tímto způsobem se hledá plocha, která by odpovídala střešní rovině. 3D poloha střešních rovin je tak určena z dat ALS a přesná poloha okrajů ploch z leteckých snímků.

JINHUI et al.

JINHUI et al. (2004) využívá leteckých snímků jako podpůrných dat pro automatizaci hledání budov v laserových datech a ke zpřesnění polohy obrysů budovy. V prvním kroku jsou v DMP, získaném z dat ALS, určeny hrubé obrysy budov. Na leteckém snímku jsou

hrany detekovány pomocí canny operátoru. Pomocí hrubých obrysů budov, získaných v prvním kroku celého postupu, jsou pak odstraněny hrany nepatřící budovám. Ze zbylých linií je pak možné relativně přesně a spolehlivě určit skutečné okraje budov. Přesné určování 2D polohy okrajů střechy z LMS použil ve své práci i WANG (2007).

V případě zde zmíněných metod kombinujících letecké měřické snímky a laserová data se dosud jedná spíše o demonstraci technologie než o hotové produkty. Náročnost tvorby těchto algoritmů je nepoměrně vyšší než v případě jednoho datového zdroje. Všechny studie však ukazují slibné výsledky a široké možnosti, které kombinace těchto dat nabízí.

4.4 Metody využívající 2D GIS

Kromě mračna laserových bodů a leteckých snímků se při vytváření prostorových modelů budov využívají rovněž existující pozemní plány v digitální podobě. Některé metody tuto možnost umožňují pro zvýšení automatizace či zlepšení výsledků, některé pozemní plány přímo vyžadují. Hlavním přínosem je podle VOSELMANA (2002) snížení komplexnosti problému a zjednodušení automatizace postupu. Podle HAALY a BRENNERA (1997) rovněž redukuje požadavky na prostorové rozlišení a kvalitu ostatních datových zdrojů.

Jednou z možností využití tohoto typu dat je například určení přesné polohy budovy. Určité odchylky vlivem nepřesnosti a generalizace plánů, přesahu střechy apod. nepřesahují obvykle 0,5 m. Známa orientace budovy může pomoci při hledání střešních rovin i hran pláště. Do určité míry je dokonce možné z obrysu budovy určit pravděpodobný tvar celého střešního pláště. Bohužel u složitějších půdorysů je počet možných tvarů tak vysoký, že nelze tuto možnost využít. Navíc tímto způsobem není možné modelovat střešní tvary, jako například střešní vikýře, které nejsou na obrysu budovy patrné. V neposlední řadě je pak možné složitý komplex budov rozdělit do základních tvarů pomocí segmentace pozemního plánu do čtyřúhelníkových podstav. Následným spojením jednotlivých částí potom vznikne model celého komplexu (VOSELMAN, 2002). Všechny výše zmíněné možnosti využití snižují podle WANGA (2007) složitost celého problému, ale nepodávají jeho univerzální řešení.

K vymezení pozice budovy využívá 2D GIS například BRENNER (2000) nebo SCHWALBE et al. (2005). Orientaci střešních rovin s jeho pomocí zjišťuje HAALA, BRENNER (1997) nebo FLAMANC et al. (2003). Pravděpodobný tvar střešního pláště se s využitím pozemních plánů pokouší určit HAALA, BRENNER (1997) i BRENNER (2000). K segmentaci složitého půdorysu jej naopak využívá HAALA et al. (HAALA et al., 1998a,

HAALA et al., 1998b; HAALA, BRENNER, 1998; HAALA, BRENNER, 1999) nebo VOSSelman (VOSSelman, DIKMAN, 2001; VOSSelman, SUVEG, 2001; VOSSelman, 2002).

Přestože možností aplikace pozemních plánů existuje velké množství, je třeba jej využívat s rozmyslem a stejně jako u jiných datových zdrojů sledovat jejich kvalitu. Použité obrysy budov musí být zejména kompletní, spolehlivé, aktuální a mít požadovanou přesnost (SCHWALBE et al., 2005). Problematiku aktuálnosti zmiňuje také HAALA et al. (1998b) nebo WANG (2007).

5 Podkladová data

Navržená metoda využívá tři druhy podkladových dat: digitální katastrální mapy (DKM), barevná ortofota a data leteckého laserového skenování (ALS – airborne laser scanning). Ukázková data pokrývají část města Brna a Sobotky (Královéhradecký kraj, okres Jičín). Protože navržená metoda prozatím neobsahuje možnost segmentace složitějších plánů budovy, byly vybrány pouze budovy s obdélníkovým či čtvercovým půdorysem. Metoda byla odzkoušena celkem na 50 vybraných budovách, 6 z Brna a 44 ze Sobotky.

U šesti vybraných budov z oblasti Brna se jednalo ve všech případech o relativně jednoduché sedlové střechy. V některých případech byla situace ztížena velkými vikýři či jinými střešními objekty. V Sobotce patřily mezi vybrané budovy většinou rodinné domky se sedlovou či rovinnou střechou. V menší míře se vyskytovaly střechy valbové a jehlanové.

5.1 DKM

Pro nalezení přesné polohy střešního pláště budovy na ortofotu bylo nutné použít digitální databázi obsahující obrysy těchto budov. Tato data v potřebné podrobnosti a přesnosti obsahují pouze katastrální mapy. DKM bohužel není k dispozici pro celé území ČR. K 31.12.2007 bylo vektorovou mapou pokryto pouze 35,8 % území. Na postupné digitalizaci analogových podkladů se dále pracuje (Český úřad zeměměřický a katastrální, cit. 12.6.2008).

Tato data je možné získat ve formě nového výměnného formátu (.vfk). Pomocí programu ISKN Studio lze tento formát převést do osobní databáze programu ArcGIS. ISKN Studio je volně stažitelné ze stránek firmy Arcdata Praha (ARCDATA PRAHA, 2007). Pro potřeby diplomové práce byla Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK) poskytnuta data ve formě shapefilů (.shp). Pro jejich zpracování byl využit program ArcView 9.2 s extenzí XTools Pro 5.1. Tato extenze je rovněž volně stažitelná ze stránek firmy Data East (Data East, 2007).

5.2 Barevná ortofota

Pro určení tvaru střešního pláště budov bylo v navržené metodě využito barevných ortofot (barevných ortorektifikovaných leteckých měřických snímků). Barevná ortofota obou zájmových území poskytl v digitální podobě s dostačujícím prostorovým rozlišením 0,5 m opět ČÚZK.

5.3 ALS

Laserová data z oblasti Brna poskytla firma GEODIS Brno. Na měření bylo využito laseru s eliptickou stopou. Jedno místo na Zemi tak bylo měřeno z více směrů a mračno bodů tak neobsahuje velké množství hluchých míst. Kvůli navýšení hustoty bodů a odstranění zbývajících prázdných míst bylo provedeno více přeletů v různých směrech, čímž bylo dosaženo velmi vysoké hustoty bodů. Průměrná hustota u sledovaných budov byla přibližně 24 bodů/m². Měřeny byly první a poslední odrazy, které nešlo v datovém souboru od sebe odlišit, což však nebylo při jejich zpracování na škodu. Výšková přesnost dat je přibližně 10 cm, délka stopy laserového paprsku na zemském povrchu je asi 20 cm. Data byla získána ve formátu xyz v podobě tří sloupců souřadnic X, Y, Z souřadného systému JTSK (PIKHARTOVÁ, 2007).

Zkušební data ze Sobotky byla pořízena rakouskou firmou RIEGL. Na měření bylo použito laseru s paralelní stopou s průměrnou výškou letu 1200 m nad střední výškou země. Hustota naměřených bodů tak byla oproti datové sadě z Brna velmi nízká. Jeden bod připadal na plochu o velikosti 80 cm x 80 cm, tj. přibližně 1,5 bodu/m². Navíc při snímání došlo k chybě. Laserové paprsky vysílané kolmo k zemi se odrážely od skleněné tabule v podlaze letadla a uprostřed pásu snímaných bodů tak vznikly mezery na kterých se nevyskytují body žádné. Tyto mezery však tvoří jen velmi malou část plochy a pro většinu budov tak mohla být tato data použita. Zaznamenána byla celá vrácená vlna. Avšak v případě že se výšky prvního a posledního odrazu od sebe příliš nelišily, byl ve výsledném souboru použit pouze poslední odraz. Výšková přesnost dat opět nepřesahuje 10 cm. Data byla získána v podobě tří sloupců souřadnic zobrazení UTM souřadného systému WGS 84. Před jejich použitím proto musela být provedena transformace do Křovákovy zobrazení systému JTSK.

6 Metodika

6.1 Návrh metody modelování budov

6.1.1 Požadavky na tvorbu metody

Metoda tvorby 3D modelů budov navržená v této diplomové vychází z požadavků Českého úřadu zeměměřického a katastrálního. Údaje o výšce budovy a tvaru střechy by se mohly stát novými atributy budov digitální geografické databáze ZABAGED. Výsledná metoda by měla splňovat zejména tyto podmínky:

- maximální možná automatizace
- využití dostupných zdrojů dat
- vysoká přesnost a spolehlivost výsledků

Základní báze geografických dat ZABAGED zabírá svým rozsahem celou oblast České republiky. Jakýkoliv manuální zásah pracovníků Odboru správy ZABAGED by proto radikálně zvýšil náročnost a dobu zpracování tak velkého množství dat, a to nejen při tvorbě nových atributů databáze, ale také při jejich pravidelné aktualizaci. Jednou z hlavních podmínek pro hledanou metodu byl proto maximální možný stupeň automatizace celého procesu.

Automatické zpracování stereodvojic leteckých snímků, jež má Zeměměřický úřad k dispozici, je prakticky nemožné. U laserových dat, která umožňují vyšší stupeň automatizace, by však bylo nutné nasnímat celé území České republiky. Při nízké letové hladině, která zajišťuje velmi husté mračno bodů, by byly ekonomické náklady neúměrně vysoké. V současné době (léto 2008) připravuje ZÚ laserové skenování celého území ČR pro zpřesnění stávajícího Digitálního modelu terénu (DMT) a dalších odvozených produktů. K tomuto účelu stačí i velmi řídké mračno bodů ALS pořízené při vysoké letové hladině. Druhým požadavkem proto bylo, aby metoda, pokud možno, využívala tato dostupná data s velmi nízkou hustotou bodového mračna.

I při ne příliš vysoké kvalitě vstupních dat by měla metoda podávat výsledky s co nejvyšší dosažitelnou přesností a spolehlivostí.

Na druhou stranu z požadavků na dobrý systém, které ve své práci uvádí HOFMANN (2005), není nutné, aby metoda byla příliš univerzální a detailní. Přímým výsledkem celé

metody nemá být prostorový model budovy, ale pouze údaj o tvaru střešního pláště a výšce budovy. Z tohoto důvodu by bylo zbytečné detailně modelovat například střešní vikýře. Tento údaj by totiž stejně nebyl ve výsledku využit. Vzhledem k nízké hustotě mračna laserových bodů by to navíc bylo i nemožné.

Ze stejného důvodu není nutné vytvářet příliš univerzální modely budov. V databázi ZABAGED není možné uchovat údaj o všech myslitelných tvarech střešního pláště, které se mohou na budovách vyskytovat. Metoda by měla určovat pouze základní, nejčastěji se vyskytující typy střech a v případě, že má střecha složitější tvar, ji určit jako neidentifikovanou.

6.1.2 Charakteristika metody

Navržená metoda je založena na principu řízeném modelem. K rekonstrukci budov využívá předem připravených základních modelů budov a zkouší, který model nejlépe odpovídá vlastním datům. Použití tohoto přístupu bylo nutné kvůli nízké hustotě bodů ALS a nutnosti vysoké automatizace. Nízká univerzálnost a detailnost metody řízené modelem není v tomto případě příliš na škodu.

Základními tvary střešního pláště použitými v této práci jsou střechy: rovinná (pultová), sedlová se štítem, sedlová s valbou (valbová) a jehlanová (stanová). Další tvary střešního pláště, jako je například mansardová či polovalbová střecha, se nevyskytují tak často. Určování těchto tvarů by navíc bylo vzhledem k nedostačující kvalitě dat velmi obtížné a nespolehlivé. Proto byly z uvažovaných základních modelů střech vypuštěny.

Tyto základní typy střech se čtvercovým či obdélníkovým půdorysem bývají často spojovány do větších a složitějších komplexů. Množství tvarů, které lze tímto způsobem vytvořit, je obrovské. U metod řízených modelem je proto nutné provést nejprve segmentaci do čtvercových či obdélníkových částí a jednotlivé segmenty modelovat zvlášť. Nakonec je možné tyto segmenty opět spojit do jednoho modelu (HOFMANN, 2005). Problémem segmentace budov se ve své práci zabýval například HAALA et al. (1998b), nebo HAALA, BRENNER (1998). Proces segmentace budov do čtyřúhelníkových částí je však extrémně náročný úkol i při znalosti pozemního plánu (HOFMANN, 2005). Protože by tím náročnost celé metody vzrostla nad rámec práce, není tento krok řešen a představená metoda pracuje v současném stavu pouze s budovami čtyřúhelníkového půdorysu.

Výsledkem celé metody není konkrétní model střechy, ale pouze údaj o typu střešního pláště a výšce budovy. Výškou budovy se v tomto případě rozumí nadmořská výška nejvýše položené hrany (bodu) střešního pláště. Výška komínů, antén a dalších střešních objektů není

brána v úvahu. Pomocí těchto atributů a známého půdorysu budovy je pak možné jednoduchý model budovy vytvořit.

Výsledkem této práce je podrobně zpracovaný postup určení typu střešního pláště a výšky budovy. Pokud to bylo možné, byly pro zpracování dat využity nástroje již existujících aplikací či vhodné hotové skripty převzaté od jiných autorů. Většinou však bylo nutné tyto skripty pro potřeby práce upravit nebo je celé vytvořit.

6.1.3 Postup práce

Celý postup určování tvaru střech a výšky budov můžeme rozdělit do tří na sebe navazujících částí. Nejprve je nutné upravit data DKM a barevná ortofota tak, aby bylo možné určit tvar střechy. Pomocí známých obrysů budov nejprve vyřízneme část ortofota obsahující příslušnou budovu. Jelikož střecha budovy leží ve značné výšce nad zemí, nachází se, vlivem středového promítání, na leteckém snímku střecha jinde, než leží obrys budovy získaný z DKM. Abychom měli jistotu, že se střecha budovy bude nacházet ve výřezu snímku, je pro výřez ortofota použit buffer. Kromě toho musíme vytvořit i vzor pro vyhledávání přesné polohy střechy. To se provede konverzí obrysu budovy z vektorové podoby do rastru. Úprava dat je prováděna pomocí nástrojů programu ArcView 9.2 s volně stažitelnou extenzí XTools Pro 5.1.

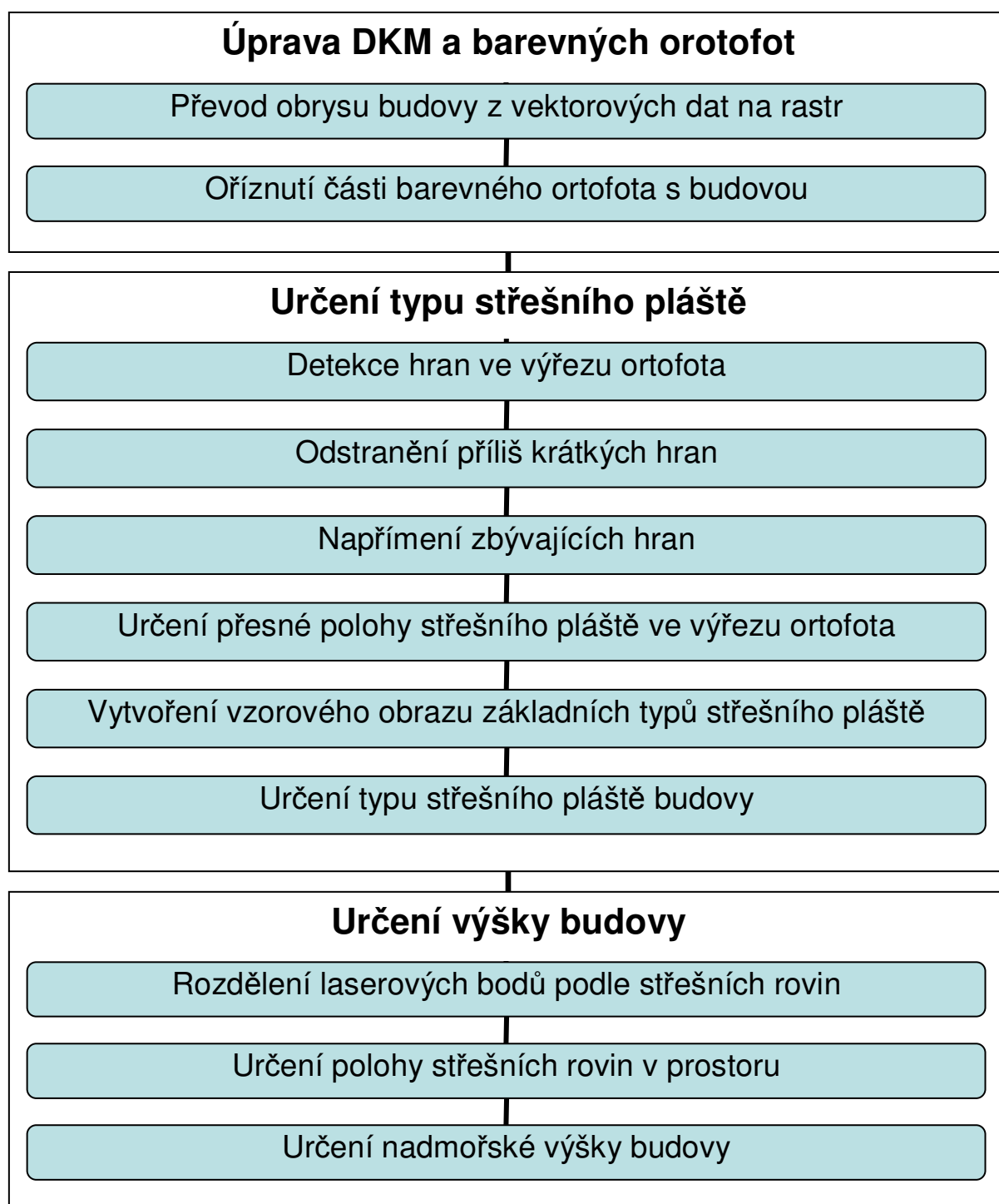
Ve druhé, nejnáročnější části práce je prováděno samotné určování typu střešního pláště pomocí metody obrazové korelace. Pro provedení korelace obrazů je nutné nejdříve detekovat hrany ve výřezu barevného ortofota. Díky vysoké komplexnosti informací obsažených v leteckých snímcích obsahuje výsledný obraz i velké množství nepatřičných hran, které nenáleží ani okrajům budovy, ani hranám střešního pláště. Před dalším postupem musíme proto odstranit co největší množství rušivých hran, jež by se při porovnávání obrazů mohly stát zdrojem chyb.

V následné fázi je posouván rastr obsahující obrys střechy po obrazu s detekovanými (a upravenými) hranami. Výpočtem koeficientu korelace (KK) v každé pozici je možné určit nejpravděpodobnější polohu střešního pláště ve výřezu ortofota. Podobným postupem je možné určit i tvar střešního pláště. Ze známých obrazových souřadnic rohů budovy je vytvořen obraz se vzorem základních typů střešního pláště – rovinná, sedlová, valbová a jehlanová. Jednotlivé vzory se pak porovnají s detekovanými hranami a obraz s nejvyšší hodnotou KK je určen jako nejpravděpodobnější typ střešního pláště. K detekci hran i k určení polohy a tvaru střechy jsou využity funkce vytvořené v programu Matlab 7.0.1.

V poslední, třetí fázi je využito laserových dat. V programu ArcView 9.2 jsou nejdříve, pomocí známého typu střechy a obrysu budovy, vybrány body náležící jednotlivým střešním rovinám. Souřadnice těchto bodů a rohy budov se následně exportují do textového souboru, aby je bylo možné načíst do prostředí programu Matlab. Z prostorových souřadnic bodů jsou pomocí metody nejmenších čtverců (MNČ) vypočítány parametry obecné rovnice střešních rovin. Dosazením 2D polohy uzlových bodů do těchto rovnic je určena jejich nadmořská výška. Výška nejvyšší hrany (bodu) střešního pláště určuje zároveň i výšku celé budovy. K výpočtu výsledné výšky budovy jsou využity funkce vytvořené v programu Matlab 7.0.1.

Podrobný popis jednotlivých částí celé metody je uveden v kapitolách 6.2 až 6.4. Dílčí kroky postupu jsou přehledně zobrazeny v následujícím diagramu (Obr. 1):

Obr. 1: Schéma postupu zpracování



Zdroj: vlastní

6.2 Úprava DKM a barevných ortofot

6.2.1 Popis metod

Jednotlivé nástroje jsou řazeny v chronologickém pořadí, ve kterém jsou použity.

Polygon to polyline

Nástroj extenze XTools Pro, který převede shapefile budov z polygonu do polylinie. Z těchto linií je pak možné vytvořit rastr obsahující obrys budovy.

Create random raster (management)

Pomocí tohoto nástroje je v oblasti definované obrysem budovy vytvořen rastr s hodnotou pixelu 0. Velikost pixelu je nutné nastavit na velikost shodnou s použitým ortofotem (0,5 m). Pro správný průběh následujících nástrojů je nutné uložit výsledný rastr ve formátu .tif.

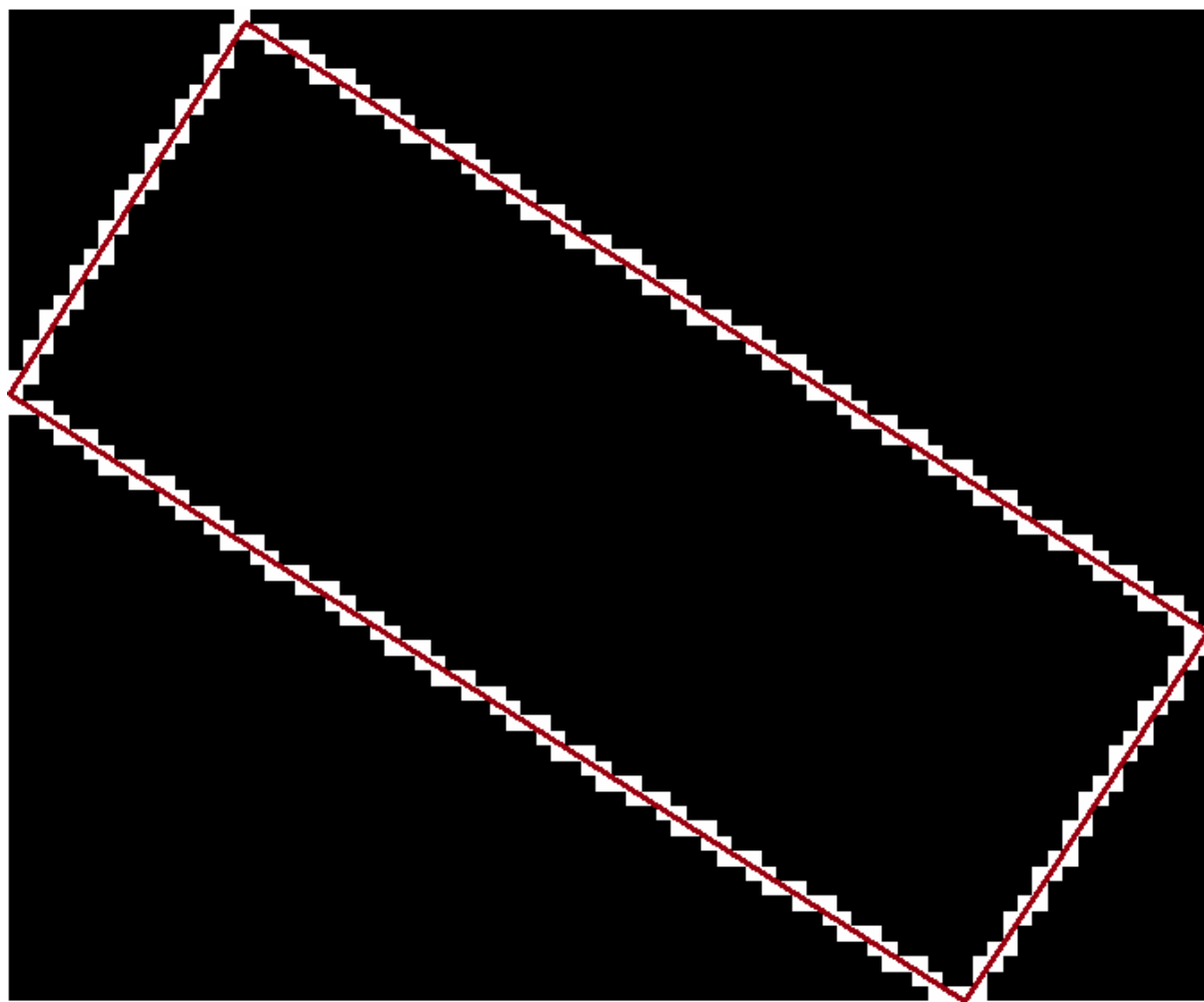
Polyline to raster

Tento nástroj převede liniový shapefile obrysu budovy (vytvořený pomocí funkce *Polygon to polyline*) na rastr, kterému přiřadí hodnotu zvoleného pole. Rastr se vytvoří pouze v místech, kudy linie prochází. Těmto pixelům je zadána hodnota 255 odpovídající nejvyšší možné hodnotě obrazu při 8bitovém kódování. V místech kudy linie neprochází, se rastr nevytvoří vůbec. Velikost pixelu je nutné nastavit opět na velikost shodnou s použitým ortofotem (0,5 m). Pro správný průběh následujících nástrojů je nutné uložit výsledný rastr ve formátu .tif.

Mosaic to new raster

Tento nástroj spojí rastr obsahující pouze obrys budovy s rastrem o velikosti minmax boxu tohoto obrysu. V místě, kde se tyto rastry překrývají, je novému obrazu přiřazena vždy vyšší hodnota obou pixelů. Výsledkem je rastr obsahující obrys střechy, který je v druhé části celé metody použit jako vzor pro určení přesné polohy střechy vy výřezu ortofota. Velikost pixelu je nutné nastavit na velikost shodnou s použitým ortofotem (0,5 m). Pro správný průběh následujících nástrojů nesmí být při uložení rastru zadán žádný formát. Naopak musí být uložen v obecném gridu programu ArcGIS.

Obr. 2: Vytvoření vzorového obrazu z obrysu budovy



Zdroj: vlastní, grafické uživatelské rozhraní programu ArcView 9.2

Buffer

Jelikož střecha budovy leží ve značné výšce nad zemí, nachází se vlivem středového promítání na leteckém snímku jinde, než leží obrys budovy získaný z DKM. Abychom měli jistotu, že se střecha budovy bude nalézat ve výřezu snímku, je na vektorový obrys budovy použit buffer. Pro oblast Sobotky byla jeho velikost nastavena na 5 m, pro budovy z Brna na 7 m. Problematika nastavení velikosti bufferu je vysvětlena v kapitole 6.3.3. Výsledný buffer je potom použit na oříznutí barevného ortofota.

Clip (management)

Nástroj *Clip* ořízne vybrané ortofoto podle minmax boxu obrysu budovy se zadanou velikostí bufferu. Tím je získán obraz obsahující střechu i v případě velkého posunu vůči půdorysu budovy.

Obr. 3: Posun střešního pláště vůči půdorysu budovy a výřez části ortofota s budovou



Zdroj: vlastní, grafické uživatelské rozhraní programu ArcView 9.2

Export

Výsledný výřez ortofota a rastr obsahující obrys budovy je nutné exportovat do formátu .bmp nebo jiného formátu se kterým dokáže pracovat program Matlab.

6.2.2 Model builder

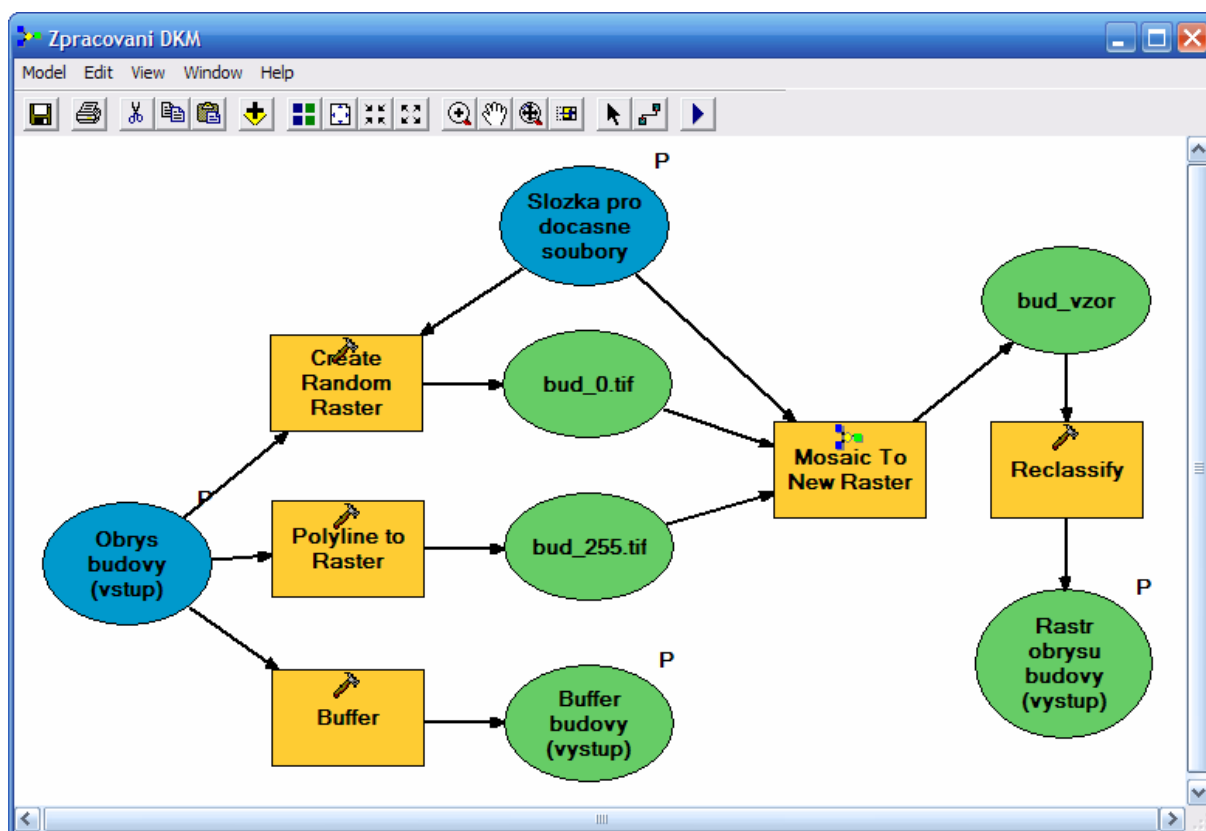
Program ArcView 9.2 dokáže pomocí aplikace Model Builder spojovat větší množství nástrojů do jednoho. To je výhodné zejména v případě, kdy opakovaně aplikujeme stejnou sadu nástrojů na větší množství dat. Spojením všech nástrojů do jedné funkce je pak možné provést zpracování dat v jednom kroku. Pro jednodušší práci s daty byly jednotlivé nástroje uvedené v kapitole 6.2.1 sloučeny do jedné funkce *Zpracování DKM*.

Nástroj *Convert polygons to polylines* bohužel není součástí programu ArcView, ale extenze XTools Pro. Z toho důvodu jej do funkce *Zpracování DKM* nebylo možné zařadit. Nástroj *Clip* je sice přímo součástí ArcView, ale po začlenění do funkce vytvořené pomocí Model

Builderu bohužel nefunguje správně. Načte sice jako parametr shapefile obsahující buffer obrysu budovy, avšak nepřevzme z něj souřadnice jeho minmax boxu, takže příslušné ortofoto neořízne. Tyto dva nástroje bylo proto nutné spustit samostatně.

Přestože v nástroji *Mosaic to new raster* lze nastavit barevnou hloubku výsledného obrazu, při vložení do funkce *Model builder* je výsledný obraz automaticky uložen v 16bitovém kódování. Aby bylo možné s rastrem později pracovat v programu Matlab, sníží nástroj *Reclassify* barevnou hloubku obrazu na 8bitový. Jednotlivým pixelům se ponechá stejná hodnota. Tento nástroj je možné připojit k výsledné funkci vytvořené v *Model builderu*.

Obr. 4: Spojení nástrojů pro úpravu DKM pomocí aplikace Model Builder



Zdroj: vlastní, grafické uživatelské rozhraní programu ArcView 9.2

6.3 Určení typu střešního pláště

Způsoby detekce hran obrazu a jejich úpravou se zabýval KOVESI (2000), který pro tento účel vytvořil v programu Matlab velké množství funkcí. Některé z nich bylo možné s úspěchem použít v připravované metodě. Pro potřeby práce je však bylo nutné upravit, případně nalézt hodnoty některých parametrů, při nichž podávají funkce nejlepší výsledky.

Výstupem této části postupu je údaj o typu střešního pláště, který spolu s nadmořskou výškou budovy tvoří výstup celé metody. Podrobný postup jednotlivých dílčích kroků je uveden v kapitolách 6.3.1 až 6.3.4. Popis samotných funkcí je uveden v příloze.

6.3.1 Detekce hran

Aby bylo možné provést určení tvaru střešního pláště pomocí metody obrazové korelace, je nutné ve výřezu ortofota nejprve provést detekci hran. K tomuto účelu se nejlépe hodí Cannyho operátor, který lze spustit zabudovanou funkcí *edge* programu Matlab. Jeho výhodou je možnost nastavení hodnoty parametrů, které dovolují uživateli upravovat citlivost operátoru na změnu kontrastu obrazu. Cannyho operátor umožňuje nastavení dvou různě velkých prahových hodnot pro detekování takzvaných slabých a silných hran. Slabé hrany jsou obsaženy ve výsledném obraze pouze v případě, že se dotýkají některé silné hrany. Díky tomu není tento hranový operátor tolik ovlivněn šumem v obraze. Čím menší je velikost prahových hodnot, tím citlivější je operátor (tím více hran nalezne). Třetí parametr (σ) určuje velikost směrodatné odchylky použitého Gaussova filtru. Při nastavení vyšší hodnoty σ výsledný obraz neobsahuje tolik krátkých (většinou nepatřičných) hran, avšak na druhou stranu jsou nalezené hrany nesprávně zaobleny.

Jak už bylo řečeno, je detekce hran prováděna ve výřezu barevného digitálního ortofota. Pro uložení dat je v tomto případě využito barevného modelu RGB (Red – Green – Blue), ve kterém je výsledná barva pixelu vytvořena kombinací intenzity barev červené, zelené a modré. Tyto barvy jsou uloženy ve třech samostatných pásmech obrazu. Funkce *edge* však dokáže vyhledávat hrany pouze v jednom pásmu. Proto bylo nutné provést transformaci barevného modelu RGB do YCbCr. Složka Y v tomto případě reprezentuje celkovou intenzitu obrazu a složky Cb a Cr chromatické komponenty, modrou a červenou. Detekce hran je provedena pouze u složky vyjadřující intenzitu a poté je obraz převeden zpět do barevného modelu RGB. Tato transformace i její zpětný převod jsou bezztrátové (nedochází při nich ke ztrátě informací) a lze je provést pomocí zabudovaných funkcí Matlabu - *rgb2ycbcr* a *ycbcr2rgb*.

6.3.2 Úprava hran

Barevná ortofota obsahují velké množství komplexních informací o zemském povrchu. To jim sice dává široké možnosti uplatnění, ale na druhou stranu to činí interpretaci dílčích informací velmi obtížnou. Při detekci hran jsou nalezeny nejen skutečné hrany střešního pláště, ale i místa, kde dochází ke změně barvy střešní krytiny, hranice dopadajících stínů apod. V případě nastavení nízké citlivosti operátoru algoritmus některé nejasné hrany vůbec nenalezne. Při vysoké citlivosti naopak výsledný obraz obsahuje velké množství nepatřičných hran (Obr. 5). V praxi se nejlépe osvědčila vysoká citlivost hranového operátoru s nastavením prahových hodnot na velikost 0,08 a 0,16 a hodnoty σ na 0,3. Nepatřičné hrany jsou poté dalším postupem odstraněny.

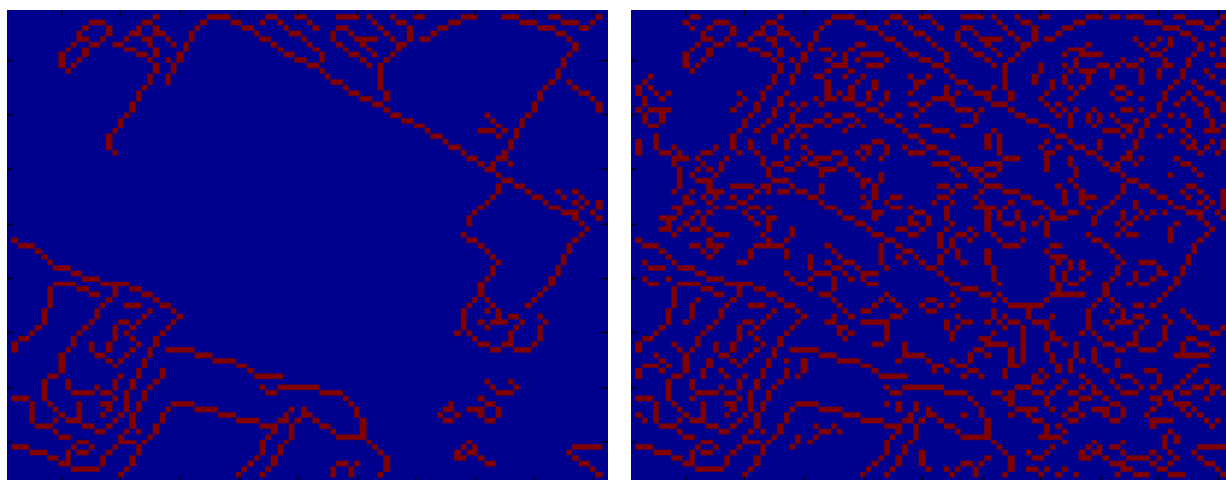
Rozeznání správně a chybně určených hran je extrémně náročný a mnohdy i nemožný úkol. Můžeme však říci, že hrany náležící střešnímu plášti tvoří ve většině případů dlouhé přímé linie. Naproti tomu velké množství chybně určených hran tvoří jen krátké zakřivené úseky. Algoritmus proto postupně prochází celý obraz a vyhledává jednotlivé oddělené segmenty, které ukládá do zvláštního seznamu. Počet pixelů v každém segmentu určuje délku hrany. Seznam však může obsahovat i segmenty, které mají plošný charakter. Tyto plošky by mohly obsahovat vysoký počet pixelů i při malé délce. Aby bylo zajištěno, že seznam bude obsahovat pouze liniové segmenty, je třeba provést ztenčení těchto plošek na tvary se šířkou jednoho pixelu. K tomuto účelu dobře poslouží zabudovaná funkce programu Matlab *bwmorph*, která provede skeletonizaci obrazu. Liniové segmenty, které nedosahují potřebné délky určené prahovou hodnotou (obsahují malý počet pixelů), jsou ze seznamu odstraněny.

Výsledný obraz obsahuje pouze dlouhé linie. Avšak i v případě, že se ve skutečnosti jedná o přímé úsečky, jsou nalezené hrany vlivem nízkého kontrastu a šumu často zakřivené. Aby se obraz s nalezenými hranami co nejvíce podobal vzoru získaném z obrysu budovy, je nutné tyto linie napřímit. Ze seznamu obsahujícího zbylé hrany jsou vybrány první a poslední body každého úseku. Následně se prochází všechny body patřící jedné hraně a vyhledává se bod s maximální odchylkou od přímé linie spojující počátek a konec. Pokud tato odchylka překračuje prahovou hodnotu, je linie v příslušném bodě rozdělena na dva úseky, které jsou následně prozkoumány stejným způsobem. Pokud není prahová hodnota překročena, jsou všechny pixely náležící této linii nahrazeny pouze pixely ležícími na úsečce spojující počáteční a koncový bod.

Seznam obsahující obrazové souřadnice vybraných pixelů je potom nutné převést zpět na matici reprezentující obraz s detekovanými hranami. Pomocí přednastavené funkce programu

Matlab *zeros* se nejprve vytvoří rastr s příslušnou velikostí, v němž všechny pixely nabývají hodnoty nula. Pixelům, jejichž obrazové souřadnice jsou obsaženy v seznamu, je pak přiřazena hodnota 255 (maximální hodnota obrazu při použití 8bitového kódování). Výsledkem je obraz obsahující pouze přímé linie s minimální délkou určenou zadanou prahovou hodnotou (Obr. 6). Takto upravený obraz detekovaných hran je připraven pro porovnávání se vzorem získaným z obrysu budovy.

Obr. 5: Obraz detekovaných hran při nastavení nízké (vlevo) a vysoké (vpravo) citlivosti hranového operátoru



Zdroj: vlastní, grafické uživatelské rozhraní programu Matlab 7.0.1

Obr. 6: Původní budova ve výřezu barevného ortofota (vlevo) a výsledný obraz upravených detekovaných hran (vpravo)



Zdroj: vlastní, grafické uživatelské rozhraní programu Matlab 7.0.1

6.3.3 Určení polohy střechy

Jak již bylo řečeno, nachází se, vlivem středového promítání kamery, střecha budovy jinde, než její pata určená obrysem z DKM. Aby bylo možné určit tvar střešního pláště, je nejprve nutné zjistit jeho přesnou polohu na výřezu ortofota. To se provede porovnáním vzoru obsahujícího obrys budovy s obrazem detekovaných a upravených hran. Vzor má velikost minmax boxu budovy a proto je zákonitě menší než výřez ortofota, na který byl použit buffer.

Určení hodnoty bufferu nebylo snadné, jelikož velikost posunutí střechy závisí nejen na úhlu snímání, z něhož byla budova pořízena, ale také na výšce budovy, kterou v současné chvíli ještě neznáme. V praxi je vhodné zvolit velikost bufferu podle charakteru zástavby. V oblasti Sobotky, kde převažují menší rodinné domky se osvědčila velikost 5 m. Pro vyšší budovy z Brna bylo nutné použít buffer velikosti 7 m. Do takto velkých výřezů ortofota se vešly všechny zkoumané budovy. Na druhou stranu nebyly tyto výřezy ani příliš velké na to, aby činily určení polohy budovy ještě obtížnější a méně spolehlivé.

Vzor je postupně posouván po obrazu s detekovanými hranami. Pro každou polohu je na překrývající se oblasti vypočten koeficient korelace (KK). Výběrem pozice s maximální hodnotou KK je určena nejpravděpodobnější poloha střešního pláště ve výřezu ortofota.

V některém případě může dojít k situaci, kdy byly nalezené hrany určeny špatně nebo vytváří hrany poblíž budovy vzor podobný obrysu budovy. V prvním případě bude maximální hodnota KK příliš nízká. Ve druhém případě bude existovat jedna nebo více hodnot, které téměř dosahují maximální hodnoty. V obou případech je výsledkem algoritmu rovněž informace o vysoké pravděpodobnosti chybného průběhu. V tomto případě závisí na uživateli, zda potenciálně chybný výsledek akceptuje, nebo určí tvar a výšku střechy manuálně. Touto možností se však už metoda představená v této práci nezabývá.

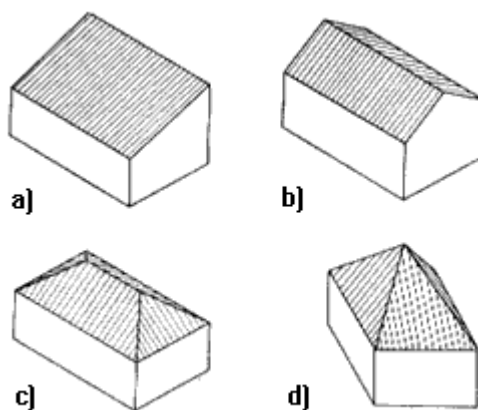
6.3.4 Určení tvaru střechy

Představená metoda je metoda řízená modelem. To znamená, že k nalezení potřebných parametrů využívá předem připravené sady základních modelů, které srovnává s dostupnými daty. Typy střešních plášťů použitých v práci jsou tyto (Obr. 7):

- **rovinná (pultová) střecha** – Zvláštním případem tohoto typu je i plochá střecha.
- **sedlová střecha se štítem** – V tomto případě se jedná vlastně o dva typy střešního pláště. Podle orientace sedla rozeznáváme sedlo s orientací podél delší stěny budovy (nejčastější případ) a podél kratší stěny budovy.

- **valbová střecha (sedlová s valbou)** – V tomto případě je sedlo orientováno vždy podél nejdelší stěny budovy. Není možné, aby valba vybíhala ze širší stěny.
- **jehlanová (stanová) střecha** – Má tvar čtyřbokého jehlanu. Pro potřeby algoritmu je možné tento typ střechy považovat za valbovou střechu budovy, jež má čtvercový půdorys.

Obr. 7: Základní typy střech – rovinná (a), sedlová (b), valbová (c) a jehlanová (d)



Zdroj: PTÁČEK (2002-2004) - upraveno

Pokud by budova měla jiný než obdélníkový či čtvercový půdorys, bylo by v tuto chvíli nutné provést segmentaci půdorysu do čtyřúhelníkových segmentů. Poněvadž by tím množství práce vzrostlo nad rámec této práce, byla tato část vypuštěna. Metoda v současném stavu proto dokáže pracovat pouze s budovami čtyřúhelníkového půdorysu.

Pro vytvoření vzorů střešních pláštů je nejprve nutné znát obrazové souřadnice jejich rohů. Ty je možné snadno zjistit ze vzoru obsahujícího obrys budovy (obdélníkového či čtvercového tvaru). Jelikož je obraz tvořen minmax boxem obrysu, nachází se rohy nutně na okrajových částech rastru. Vlivem nepřesné reprezentace hraniční linie pravidelnou rastrovou mřížkou se však na okrajových liniích může nacházet více než jeden pixel náležící obrysu budovy. V tomto případě je jako roh vybrán pixel, který se nachází blíže k jedné ze sousedních stěn.

Ze známých obrazových souřadnic rohů budovy je pak možné vytvořit obrazy střešních pláštů (pohled shora) pro srovnání s detekovanými hranami. Z rohů střechy jsou vypočítány souřadnice uzlových bodů všech hran. Ze souřadnic uzlových bodů jsou pak vypočítány obecné rovnice přímek v rovině spojujících tyto body. Pixely ležící na těchto úsečkách mezi uzlovými body jsou uloženy do seznamu, který je poté opět převeden na matici představující obraz se vzorem daného střešního pláště.

Bohužel středové promítání leteckých snímků nemá za následek pouze posunutí střechy mimo půdorys budovy, ale i skosení střechy samotné. S detekovanými hranami proto nelze porovnávat pouze vzory střešních pláštů při pohledu shora, ale je nutné vytvořit vzory pro pohled pod různými úhly ze všech stran. Maximální posunutí horní hrany střechy vzhledem ke zbývajícím částem střešního pláště přitom nezávisí pouze na maximálním úhlu snímání, ale i na relativní výšce samotné střechy. Informaci o její výšce nemáme bohužel v tuto chvíli k dispozici. Předpokládáme-li však, že sklon střešních rovin nepřekračuje obvyklý úhel 45° , můžeme velikost posunutí stanovit pouze na základě znalosti délky kratší stěny čtyřúhelníkového půdorysu budovy.

Úhel pod kterým jsou snímány budovy na použitých ortofotech nepřekračuje hodnotu 25° . Maximální vzdálenost v o kterou je na snímku posunut nejvýše ležící bod střešního pláště vzhledem ke zbývajícím částem střechy je možné vypočítat ze vztahu

$$v = \operatorname{tg} 25^\circ \cdot h$$

kde h je výška střešního pláště. Pokud stanovíme úhel 45° jako maximální sklon střešní roviny, pak můžeme délku nejkratší stěny budovy u běžných typů střech určit jako

$$d = 2 \cdot \operatorname{tg} 45^\circ \cdot h$$

Při výpočtu poměru obou vzdáleností se nám neznámá hodnota výšky střešního pláště vykrátí a dostaneme přibližný výsledek:

$$v / d = 0,23$$

Horizontální posunutí horní hrany střešního pláště tedy na ortofotu nepřesahuje čtvrtinu délky nejkratší stěny budovy.

Pro určení tvaru střešního pláště je proto vytvořeno množství vzorů s horní hranou (bodem) střechy posunutou postupně do všech stran o velikost ležící v intervalu nula až $\frac{1}{4} d$. Všechny vzory s různými sklony střechy se porovnávají s detekovanými hranami. Nakonec je vybrán typ střechy s nejvyšší hodnotou KK u některého ze svých vzorů.

I v tomto případě se může stát, že dojde k chybě. Pokud by byla například sedlová střecha nakloněna podél orientace sedla, vytvoří detekované hrany obraz odpovídající střeše s valbou. V případě, že by tedy došlo k situaci, kdy by maximální hodnota KK dvou typů střech byla

velmi podobná, je výsledkem algoritmu také informace o vysoké pravděpodobnosti chybného průběhu. Na uživateli pak opět závisí, zda potenciálně chybný výsledek akceptuje, nebo určí tvar a výšku střechy manuálně.

6.4 Určení výšky budovy

V závěrečné fázi celé metody je z dat laserového skenování určena nadmořská výška budovy. Tato hodnota spolu s údajem o typu střešního pláště tvoří výstup celé metody. Podrobný postup jednotlivých dílčích kroků je uveden v kapitolách 6.4.1 až 6.4.4. Popis samotných funkcí je uveden v příloze.

6.4.1 Předzpracování laserových bodů

Předzpracování mračna laserových bodů je prováděno pomocí nástrojů programu ArcView 9.2. Laserové body z oblasti Sobotky byly poskytnuty v zobrazení UTM systému WGS 84. Transformace do Křovákova zobrazení systému JTSK je možná pomocí nástroje *Project*.

Pomocí známého typu střechy a obrysu budovy jsou dále vybrány body ležící na jednotlivých střešních rovinách (nástroj *Select by location*). Převedením liniového obrysu budovy na body (nástroj *Convert features to points*) jsou následně získány i rohy budovy. Jelikož ale tyto body nemají v atributové tabulce údaj o poloze v systému JTSK je nutné do nich údaj o souřadnicích X a Y vložit (nástroj *Add X, Y, Z coordinates*). Oba naposled jmenované nástroje jsou součástí extenze XTools Pro 5.1.

Atributové tabulky laserových bodů i rohů budov se následně exportují do textového souboru, aby je bylo možné načíst do prostředí programu Matlab. Desetinná čárka musí být přitom nahrazena tečkou. Jedině tak je možné souřadnice bodů správně importovat.

6.4.2 Zředění dat

Tato část postupu není součástí výsledné metody, pro kterou je výhodnější využít všechny dostupné laserové body. Nicméně pro potřeby diplomové práce bylo nutné mračno bodů rozředit, aby šlo vyzkoušet funkčnost metody i při nízké hustotě laserových bodů.

Protože by bylo obtížné určit skutečné rozměry plochy, kterou body pokrývají, je hustota určena jako počet bodů na plochu minmax boxu mračna. Pokud skutečná hustota bodů překračuje nastavenou prahovou hodnotu, je ze seznamu v pravidelných intervalech odstraněno příslušné množství bodů. Platí přitom podmínka, že množství bodů v seznamu nesmí klesnout pod 10.

6.4.3 Poloha střešní roviny v prostoru

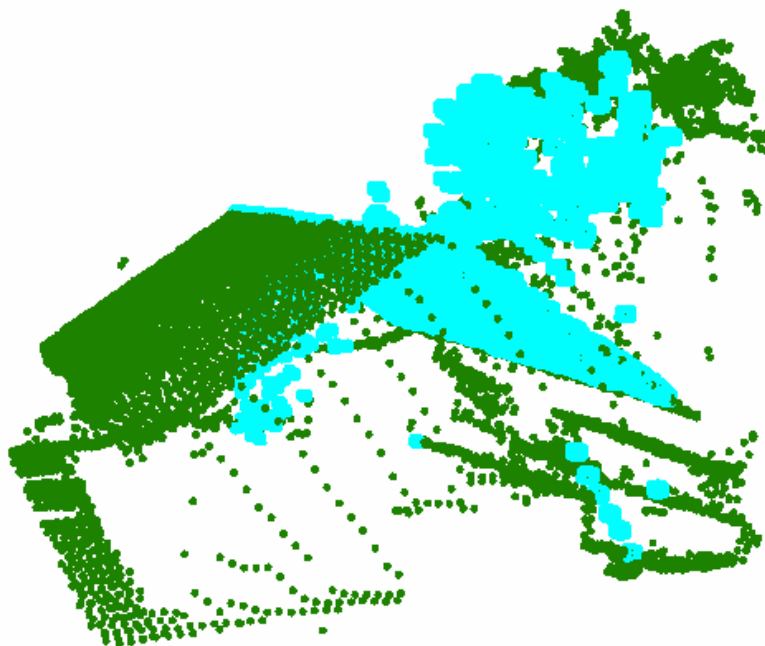
Poloha střešní roviny v je určena pomocí vyrovnávací metody nejmenších čtverců, která minimalizuje součet druhých mocnin chyb nalezeného řešení. Aplikaci této metody uvádí HAMPACHER, RADOUCH (1997). K vyrovnání hodnot dojde, pokud byla provedena nadbytečná měření, takže je možné sestavit více rovnic, než je neznámých. Vyrovnáním se hledají nejuspokojivější hodnoty neznámých (HAMPACHER, RADOUCH, 1997). Tímto způsobem jsou určeny parametry a , b , c obecné rovnice roviny v prostoru:

$$z = a \cdot x + b \cdot y + c$$

Proměnné x , y , z jsou v tomto případě souřadnicemi bodů ležících v této rovině. Dosazením 2D polohy bodu (x, y) je proto možné snadno vypočítat jeho výšku (z).

Poloha jednotlivých bodů mračna je změřena s velmi vysokou přesností. Bohužel ne vždy dopadne laserový paprsek přímo na střešní rovinu. V seznamu, z něhož se vypočítá rovnice roviny, se nachází i body ležící na stěně budovy, komínech, střešních vikýřích či vegetaci přesahující střechu budovy (Obr. 8). Vlivem těchto odlehlých měření dochází při výpočtu polohy roviny k významným chybám.

Obr. 8: Mračno laserových bodů střešní roviny (světle modrá barva), do kterého byly zařazeny i body ležící na okolních stromech či stěnách budovy. Zbývající body budovy a jejího okolí jsou znázorněny zeleně.



Zdroj: vlastní, grafické uživatelské rozhraní programu ArcView 9.2

Z tohoto důvodu probíhá výpočet v několika iteracích. Po prvním výpočtu polohy roviny se provede kontrola všech laserových bodů ze seznamu. Pro každý z bodů je vypočítán rozdíl jeho skutečné nadmořské výšky a výšky zjištěné dosazením polohy bodu do roviny. Pokud je alespoň v jednom případě překročena prahová hodnota 0,1 m, je bod s největším rozdílem výšek z výpočtu odstraněn a parametry roviny se přepočítají. Ve výpočtu se pokračuje do té doby, než není dosaženo uspokojivého výsledku a žádný z bodů nepřesahuje nastavenou prahovou hodnotu. Tento algoritmus lze použít pouze v případě, kdy na střešní rovinu dopadne více bodů než na okolní objekty. V opačném případě by totiž mohlo dojít k situaci, kdy by původní poloha roviny byla vypočítaná zcela špatně a ze seznamu by byly odstraňovány body náležící střeše budovy.

Pokud je ze seznamu odstraněna více než polovina bodů a stále se v něm vyskytují příliš odlehle body, nachází se pravděpodobně v prostoru střešní roviny příliš velké množství nepatřičných objektů (střecha je zakryta stromovou vegetací apod.). Tato situace může nastat také vlivem špatného určení typu střechy v předchozí části algoritmu. V tomto případě by se například v seznamu mohly nacházet body z více střešních rovin. V obou případech je cyklus ukončen. Poloha roviny je určena ze stávajících bodů seznamu a uživatel je upozorněn na pravděpodobně nepřesné určení polohy roviny. K ukončení cyklu dojde i v případě, kdy v seznamu zůstane méně než 10 bodů, nehledě na jejich počáteční množství.

6.4.4 Určení výšky střechy

Pro každý typ střešního pláště je výška střechy určována odlišně, avšak základní princip je ve všech případech stejný. Do obecných rovnic střešních rovin, určených v kapitole 6.4.3 se dosadí souřadnice X a Y uzlových bodů střešního pláště. Následně se porovnají výsledné nadmořské výšky těchto bodů v jednotlivých rovinách. Pokud se od sebe neliší o více než 0,5 m, je vše v pořádku a průměrná hodnota těchto výšek určuje i výslednou výšku celé budovy. Pokud rozdíl nejvyššího a nejnižšího bodu překračuje nastavený limit, je uživatel upozorněn na pravděpodobně chybný průběh výpočtu. Prahová hodnota 0,5 m byla určena experimentálně. Rozdíl výšek který nepřesahoval 0,5 m byl většinou způsoben jen malými nepřesnostmi v horizontální poloze uzlových bodů získaných z DKM. Aritmetický průměr hodnot výšek pak většinou dával velmi přesný výsledek vzhledem k výšce originálních bodů. V opačném případě došlo často k chybnému určení polohy alespoň jedné střešní roviny.

Rovinná střecha

V případě rovinné střechy je důležité nejprve určit, zda je plochá, nebo šikmá. Za plochou je považována střecha, jejíž sklon je nižší než 4° (HOFMANN, 2005). Někteří autoři považují za plochou i střechu s o něco vyšším sklonem (PIKHARTOVÁ, 2007). Z hlediska přesnosti výpočtu je však výhodnější použít nižší hodnotu. Sklon střechy je vypočítán pomocí úhlu mezi normálovým vektorem roviny a osou z.

Pokud je střecha plochá, je výsledná výška budovy určena jednoduše výpočtem mediánu výšek všech bodů. U šikmé střechy je nutné vypočítat výšku všech čtyř rohů střechy. Výška nejvyššího z nich pak určuje i výslednou výšku budovy.

Sedlová střecha

V případě sedlové střechy je postup trochu obtížnější. Protože není jisté, jakým způsobem jsou souřadnice rohů vyexportované z programu ArcView seřazeny, je nutné určit polohu sedla. Nejprve se určí poloha středů obou dvojic protilehlých stěn. Pro každou dvojici bodů se určí jejich výška v obou střešních rovinách. Dvojice bodů, jejichž výšky se od sebe více liší, je z výpočtu odstraněna. Zjevně se totiž jedná o body, jejichž spojnice vede napříč sedlem budovy. Druhá dvojice bodů tedy tvoří počáteční a koncový bod sedla.

Aritmetický průměr nadmořských výšek obou bodů v obou střešních rovinách tvoří výslednou výšku budovy. Pokud se výška nejvyššího a nejnižšího bodu liší o více než 0,5 m, upozorní program na chybu výpočtu.

Valbová střecha

Také v případě valbové střechy je nutné dát pozor na správné pořadí rohů budovy vyexportovaných z programu ArcView. Souřadnice X, Y jsou nejprve v seznamu seřazeny po směru hodinových ručiček počínaje bodem s nejvyšší hodnotou souřadnice X. Poté je určena orientace sedla střechy, která u valbové střechy vede vždy podél delší stěny budovy. Ze známé orientace sedla a pozice rohů budovy je možné snadno vypočítat polohu obou vnitřních uzlových bodů valbové střechy. Dosazením souřadnic X, Y do obecných rovnic je vypočítána výška každého bodu ve třech střešních rovinách.

V případě dvou hlavních střešních rovin, jejichž průsečnice tvoří hranu sedla, je postup podobný jako u sedlové střechy se štítem. Aritmetický průměr výšek obou uzlových bodů v obou hlavních střešních rovinách tvoří výšku vnitřní hrany střechy, avšak ještě ne výslednou výšku budovy.

Vedlejší střešní roviny, tvořící valby střechy, zabírají podstatně menší plochu než roviny hlavní. Z tohoto důvodu se na nich většinou nachází podstatně méně laserových bodů. Protože je jejich informační hodnota nižší, mají ve výpočtu pouze kontrolní a zpřesňovací význam. Výška uzlového bodu ve vedlejší rovině je porovnána s výškou zjištěnou v obou hlavních rovinách. Pokud se od sebe tyto hodnoty liší o méně než 0,5 m, je vypočítán nový aritmetický průměr ze všech tří hodnot. V opačném případě je pravděpodobně poloha vedlejší roviny určena chybně a není proto do výpočtu zahrnuta. Výsledná výška budovy je určena průměrem upravených výšek obou uzlových bodů.

Jehlanová střecha

U jehlanové střechy je výška budovy určována výškou centrálního bodu ležícího na průsečíku všech čtyř střešních rovin. Pokud se výška centrálního bodu všech střešních rovin liší o méně než 0,5 m, je za výslednou výšku budovy jednoduše považován jejich aritmetický průměr. Aby nebyl výsledek označen za chybný při špatném určení polohy jen jedné střešní roviny, postačí v opačném případě k výpočtu s dostatečnou spolehlivostí roviny tři. Pokud není možné najít žádnou trojici rovin u nichž by se výška bodu lišila o méně než 0,5 m, je výsledek považován za chybný.

7 Výsledky

Výsledkem automatizovaného postupu, jehož metodika byla podrobně zpracovaná v kapitole 6, je údaj o typu střešního pláště a nadmořské výšce budovy. Pokud při výpočtu došlo k určitým nesrovnalostem, je součástí výstupu také údaj o potenciálně chybném výsledku. Postup byl testován na budovách z Brna a Sobotky. Vzhledem k tomu, že do metody zatím nebyla implementována segmentace komplexních tvarů budov, byly z dostupných dat vybrány pouze budovy se čtvercovým či obdélníkovým půdorysem. Ve výsledku tedy bylo testováno 44 budov ze Sobotky a 6 budov z Brna. V první části byl zjišťován typ střešního pláště. Pokud byl výsledek správný, byla následně vypočítána i nadmořská výška budovy.

7.1 Výsledky určení typu střechy

Výsledky první části celého postupu přehledně ukazuje tabulka 1. V ukázkových datech z oblasti Sobotky a Brna se vyskytovaly zejména klasické sedlové střechy se štítem (22), dále pak střechy rovinné (17), jehlanové (6) a sedlové s valbou (5).

Kromě zjištěného typu střešního pláště byla sledována i správnost nalezené polohy budovy a údaj o chybném průběhu výpočtu. Pokud byla poloha budovy určena špatně, byl pokládán za špatný celý výsledek. Údajem o chybném průběhu výpočtu je uživatel varován v případě, že byl koeficient korelace výsledného typu střešního pláště příliš nízký nebo byly KK dvou a více typů střešního pláště velmi podobné. V ideálním případě by měl být tento kontrolní parametr vytvořen u všech chybných výsledků. U správných výsledků by se naopak neměl vyskytovat vůbec.

Z tabulky 1 je patrné, že zcela správného výsledku bylo dosaženo v polovině případů. Střešní plášť budovy byl určen správně a uživatel nebyl upozorněn na vysokou pravděpodobnost chyby. V osmi případech byl výsledek sice správný, avšak uživatel byl upozorněn na pravděpodobnou chybu výpočtu. U zbývajících budov (17) byl typ střešního pláště určen chybně. Z toho devětkrát byla chyba správně zjištěna, naopak osmkrát nebyl uživatel na chybu ani upozorněn.





Podíváme-li se podrobněji na jednotlivé chyby, vidíme, že ve všech případech byla rovinná, valbová nebo jehlanová střecha považována za sedlovou. K opačné situaci, kdy by sedlová střecha byla chybně označena za jiný typ střešního pláště, nedošlo. Celkem šestkrát byla chyba způsobena už nesprávným nalezením polohy budovy.

Tab. 1: Výsledky určování typu střešního pláště

Číslo budovy	Správné určení polohy	Správné určení typu SP	Údaj o chybě	Typ střechy	
				zjištěný	skutečný
brno1	ano	ano	ano	sedlová	-
brno2	ne	ano	ne	sedlová	-
brno3	ano	ano	ne	sedlová	-
brno4	ano	ano	ano	sedlová	-
brno5	ano	ano	ne	sedlová	-
brno6	ano	ano	ne	sedlová	-
sob01	ano	ano	ne	sedlová	-
sob02	ano	ano	ne	sedlová	-
sob03	ano	ano	ano	sedlová	-
sob04	ano	ano	ne	sedlová	-
sob05	ano	ano	ne	jehlanová	-
sob06	ano	ano	ne	jehlanová	-
sob07	ano	ano	ano	rovinná	-
sob08	ano	ne	ano	sedlová	rovinná
sob09	ano	ano	ne	rovinná	-
sob10	ne	ne	ano	sedlová	rovinná
sob11	ano	ne	ne	sedlová	rovinná
sob12	ano	ano	ne	sedlová	-
sob13	ano	ne	ne	sedlová	jehlanová
sob14	ano	ano	ne	sedlová	-
sob15	ano	ano	ano	sedlová	-
sob16	ano	ano	ne	sedlová	-
sob17	ano	ano	ano	sedlová	-
sob18	ano	ano	ano	sedlová	-
sob19	ne	ne	ano	sedlová	rovinná
sob20	ne	ne	ano	sedlová	rovinná
sob21	ano	ano	ne	rovinná	-
sob22	ne	ne	ne	sedlová	jehlanová
sob23	ano	ano	ne	sedlová	-
sob24	ano	ano	ne	sedlová	-
sob25	ano	ne	ne	sedlová	valbová
sob26	ano	ano	ne	valbová	-
sob27	ne	ne	ano	sedlová	rovinná
sob28	ano	ano	ne	jehlanová	-
sob29	ano	ano	ne	sedlová	-
sob30	ano	ne	ne	sedlová	jehlanová
sob31	ano	ne	ne	sedlová	rovinná
sob32	ano	ano	ne	rovinná	-
sob33	ano	ne	ne	sedlová	rovinná
sob34	ano	ano	ne	sedlová	-
sob35	ano	ano	ne	sedlová	-
sob36	ano	ne	ano	sedlová	valbová
sob37	ano	ano	ne	valbová	-
sob38	ano	ne	ano	sedlová	rovinná
sob39	ano	ano	ne	sedlová	-
sob40	ano	ano	ne	sedlová	-
sob41	ano	ano	ano	valbová	-
sob42	ano	ne	ano	sedlová	rovinná
sob43	ano	ano	ne	rovinná	-
sob44	ano	ne	ano	sedlová	rovinná

Legenda:

SP – střešní plášť

-  - typ SP určen správně, nevytvořen údaj o chybě
-  - typ SP určen správně, vytvořen údaj o chybě
-  - typ SP určen špatně, vytvořen údaj o chybě
-  - typ SP určen špatně, nevytvořen údaj o chybě

Zdroj: Výsledky metody představené v kapitole 6

7.2 Výsledky určení nadmořské výšky

Typ střešního pláště byl správně určen celkem u 33 budov. Hustota laserového bodového mračka ze Sobotky je přibližně 1,5 bodu/m². Body této datové sady byly získány z více přeletů, avšak ve střední části jednotlivých pásem body chybí. Z tohoto důvodu je hustota bodů na jednotlivých budovách velmi proměnlivá. Na čtyři budovy dokonce nepadly téměř žádné body, a proto mohla být druhá část celého postupu vyzkoušena pouze na 29 budovách.

Datová sada laserových bodů z Brna byla rovněž pořízena z více přeletů a jejich hustota na jednotlivých budovách byla různá. Průměrná hustota na vybraných budovách byla přibližně 24 bodů/m². Aby byly obě sady srovnatelné byly tyto body pravidelně zředěny na hustotu 1,5 bodů/m². Poté byla metoda vyzkoušena na ještě více zředěných datech s hustotou okolo 0,25 bodů/m². Výsledná nadmořská výška byla srovnána s hodnotami výšek originálních bodů ležících na horní hraně střechy (zjištěno v programu ArcView 9.2). Výsledek považujeme za správný, pokud se od výšky originálních bodů neliší o více než 0,1 m.

Kromě hodnoty nadmořské výšky byl sledován i údaj o chybném průběhu výpočtu. Na chybu je uživatel upozorněn v případě, kdy se výšky zjištěné z jednotlivých střešních rovin liší o více než 0,5 m.

Tabulka 2 ukazuje zjištěné nadmořské výšky při průměrné hustotě bodů 1,5 a 0,25 bodů/m², v porovnání s výškou originálních laserových bodů. V případě průměrné hustoty 1,5 bodů/m² bylo v naprosté většině případů dosaženo velmi přesného výsledku, kdy se zjištěná výška nelišila od originálních bodů o více než 0,1 m. Z toho ve čtyřech případech byl uživatel mylně informován o pravděpodobně chybném průběhu výpočtu. K chybnému určení výšky došlo pouze u dvou střešních plášťů. V prvním případě (budova sob23) činil rozdíl pouhých 19 cm a uživatel byl navíc na chybu upozorněn. V druhém případě (budova sob43) bohužel rozdíl přesahoval 1 metr a algoritmus navíc tuto chybu nezaregistroval.

U hustoty 0,25 bodů/m² už byl znát malý počet laserových bodů připadajících na jednu střešní rovinu. Z celkového množství 29 budov bylo zcela správného výsledku dosaženo v 17 případech. U sedmi budov byl uživatel mylně informován o pravděpodobně chybném průběhu výpočtu, přestože byl výsledek správný. Ke skutečně chybnému výpočtu došlo u pěti budov. Z toho ve čtyřech případech byl rozdíl relativně nízký a uživatel byl navíc na chybu upozorněn. U budovy sob43 však rozdíl opět přesahoval 1 metr a algoritmus chybu nezaregistroval.

Tab. 2: Výsledky určování nadmořské výšky budov

Číslo budovy	Nadmořská výška (m n.m.) určená v programu			Rozdíl zjištěné a skutečné výšky budov (m)	
	ArcView	Matlab (1,5 b/m2)	Matlab (0,25 b/m2)	(1,5 b/m2)	(0,25 b/m2)
brno1	228,00	227,98	227,97	-0,02	-0,03
brno3	220,70	220,66	220,63	-0,04	-0,07
brno4	223,70	223,73	223,85	0,03	0,15
brno5	223,60	223,59	223,60	-0,01	0,00
brno6	223,70	223,69	223,67	-0,01	-0,03
sob01	325,10	325,08	325,08	-0,02	-0,02
sob02	322,70	322,69	322,68	-0,01	-0,02
sob03	335,60	335,59	335,58	-0,01	-0,02
sob04	333,75	333,75	333,74	0,00	-0,01
sob07	348,45	348,43	348,46	-0,02	0,01
sob14	336,80	336,79	336,78	-0,01	-0,02
sob15	353,40	353,50	353,49	0,10	0,09
sob16	347,90	347,96	347,99	0,06	0,09
sob17	348,90	348,96	348,93	0,06	0,03
sob18	348,30	348,35	348,82	0,05	0,52
sob21	344,35	344,45	344,44	0,10	0,09
sob23	355,70	355,89	355,91	0,19	0,21
sob24	343,00	342,91	342,93	-0,09	-0,07
sob26	358,30	358,39	358,37	0,09	0,07
sob28	357,30	357,37	356,71	0,07	-0,59
sob29	337,80	337,75	337,76	-0,05	-0,04
sob32	352,90	352,98	352,97	0,08	0,07
sob34	359,50	359,51	359,53	0,01	0,03
sob35	352,20	352,15	352,15	-0,05	-0,05
sob37	341,90	341,89	341,93	-0,01	0,03
sob39	362,60	362,70	362,69	0,10	0,09
sob40	356,30	356,26	356,26	-0,04	-0,04
sob41	347,90	347,87	347,85	-0,03	-0,05
sob43	362,00	360,93	360,93	-1,07	-1,07

Legenda:

SP – střešní plášť

- nadm. výška určena správně, nevytvořen údaj o chybě
- nadm. výška určena správně, vytvořen údaj o chybě
- nadm. výška určena špatně, vytvořen údaj o chybě
- nadm. výška určena špatně, nevytvořen údaj o chybě

Zdroj: Výsledky metody představené v kapitole 6

8 Diskuze

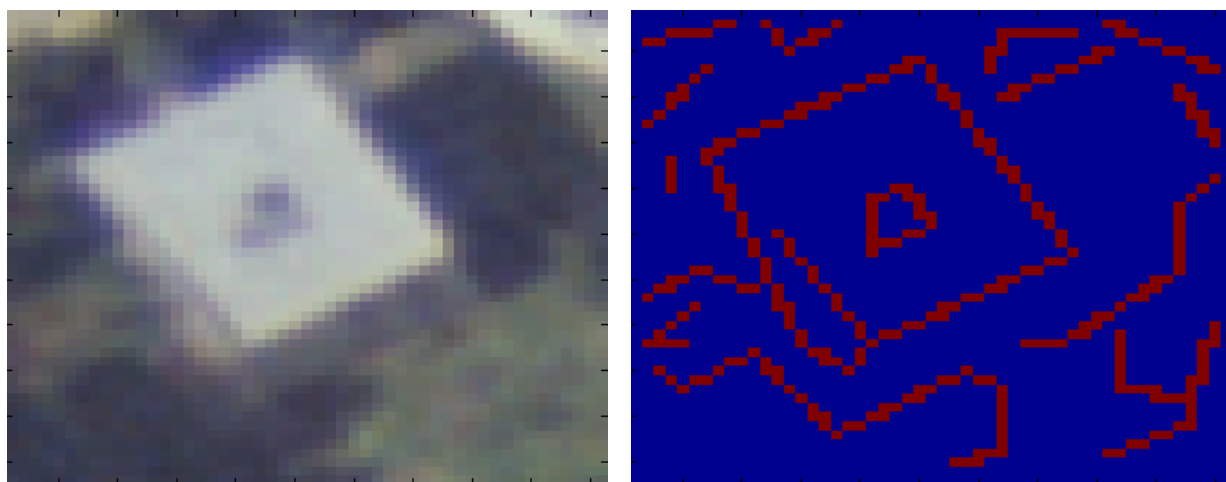
Obsahem kapitoly Diskuze je zejména zhodnocení dosažených výsledků určování typu střešního pláště a nadmořské výšky budovy. Na základě těchto výsledků jsou dále navrženy možnosti vylepšení představené metody a je zhodnocena její využitelnost v praxi.

8.1 Zhodnocení určení typu střechy

Výsledky shrnuté v kapitole 7 potvrdily, že určování typu střešního pláště z barevných ortofot je nejnáročnější fází celé metody. Ačkoli bylo této části věnováno největší úsilí, nebyly dosažené výsledky zcela spolehlivé. Z 50 sledovaných budov se podařilo typ střešního pláště správně určit ve 33 případech. U devíti budov se sice nepodařilo určit typ střechy, avšak uživatel byl na chybu ve výsledku upozorněn. Zbývajících osm budov bylo určeno špatně a uživatel navíc nebyl o chybě informován.

Nejčastěji zapříčinila chybný výsledek již nedokonalá detekce hran výřezu ortofota. Barevné snímky obsahují velké množství komplexních informací, které ale na druhou stranu činí jejich interpretaci velmi obtížnou. Následkem toho bylo ve výřezu ortofota nalezeno značné množství hran, jež neodpovídaly skutečným zlomovým liniím ve střešním plášti. Přestože byly tyto obrazy dále upravovány, ne vždy se podařilo dostatečné množství nepatřičných hran odstranit.

Obr. 9: Výřez barevného ortofota (vlevo) a obraz upravených detekovaných hran (vpravo) budovy sob38. Hrany komína uprostřed střechy byly nesprávně určeny jako sedlo.

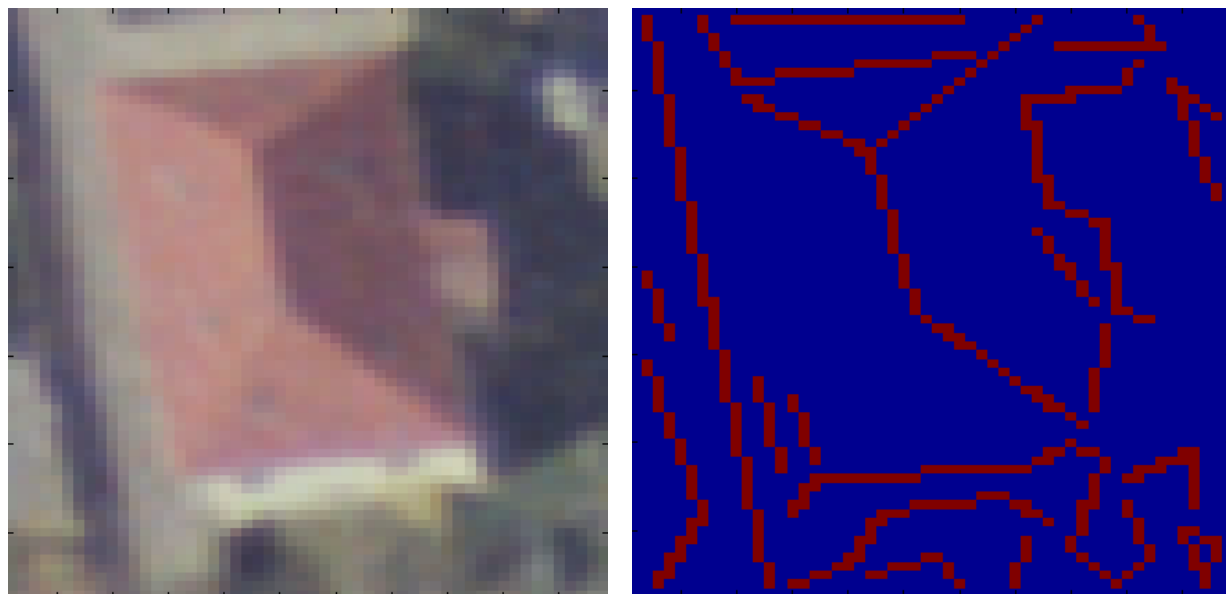


Zdroj: vlastní, grafické uživatelské rozhraní programu Matlab 7.0.1

Na Obr. 9 je ukázka čtvercové budovy s plochou střechou. Komín uprostřed střechy byl hranovým operátorem zaznamenán, a protože má linie po obvodě potřebnou délku, nebyl při následné úpravě z obrazu odstraněn. Při následné obrazové korelaci byla střecha budovy označena jako sedlová kvůli přebývajícím hranám ve střední části.

Na druhé straně byly často dvě střešní roviny nasvíceny sluncem pod stejným úhlem a hrana mezi nimi tak nemohla být hranovým operátorem zaznamenána. Na Obr. 10 je zobrazena budova s valbovou střechou. Střešní roviny ukloněné k jihu a západu jsou sluncem nasvíceny tak, že hrana mezi nimi není vůbec patrná. Při obrazové korelaci se tak výsledný obraz podobal více střechě sedlové než valbové.

Obr. 10: Výřez barevného ortofota (vlevo) a obraz upravených detekovaných hran (vpravo) budovy sob36. Jižní a západní střešní rovina byly shodně osvětleny sluncem a hrana mezi nimi tak nebyla zaznamenána.



Zdroj: vlastní, grafické uživatelské rozhraní programu Matlab 7.0.1

V některých případech došlo k situaci, kdy byly hrany střešního pláště detekovány zcela správně, a přesto byl tvar střechy určen chybně. Ve výřezu ortofota se totiž nacházely i jiné budovy či stíny, jejichž detekované hrany se velmi podobaly obrysům zkoumané budovy. Při hledání přesné polohy střešního pláště byl KK těchto tvarů vyšší než u hledané budovy, a tak nebyla správně určena ani poloha budovy.

Na Obr. 11 je ukázka podlouhlé ploché budovy. Detekované hrany dvou stejně úzkých budov po pravé straně a stín budovy samotné vytváří obraz odpovídající obrysu budovy

získaného z dat DKM. Vlivem toho byla poloha budovy chybně určena více vpravo a při následném srovnávání střešních vzorů byla budova identifikována jako sedlová.

Obr. 11: Výřez barevného ortofota (vlevo) a obraz upravených detekovaných hran (vpravo) budovy sob19. Kvůli podobným tvarům hran napravo od budovy byla špatně určena poloha střešního pláště.



Zdroj: vlastní, grafické uživatelské rozhraní programu Matlab 7.0.1

Obr. 12: Obrisy budov získané z DKM ne vždy odpovídaly skutečnosti



Zdroj: vlastní, grafické uživatelské rozhraní programu ArcView 9.2

V některých případech k chybnému určení typu pláště přispěl ne vždy přesný obrys budov získaný z dat DKM (Obr. 12). Přesnější geografická databáze budov u nás ale bohužel není k dispozici.

8.2 Zhodnocení určení výšky budovy

Na rozdíl od typu střešního pláště byly výšky budov určené navrženou metodou velmi přesné. Prahová hodnota přesnosti byla stanovena velmi přísně na 1 dm. Přesto se naprostá většina zjištěných výšek nelišila od originálních bodů o více než tuto hodnotu a byla proto určena správně.

Aby bylo možné určit minimální požadovanou hustotu mračna laserových bodů, při kterých podává metoda dostatečně přesné a spolehlivé výsledky, byl postup vyzkoušen na dvou různých hustotách laserových bodů. V prvním případě bylo použito relativně velkého množství bodů s průměrnou hustotou 1,5 bodů/m². Napodruhé byla tato sada bodů zředěna až na velmi nízkou hustotu 0,25 bodů/m². Při takto malém množství bodů se na některých střešních rovinách nacházel jen minimální stanovený počet bodů nutný ke správnému určení polohy roviny.

8.2.1 Husté mračno laserových bodů

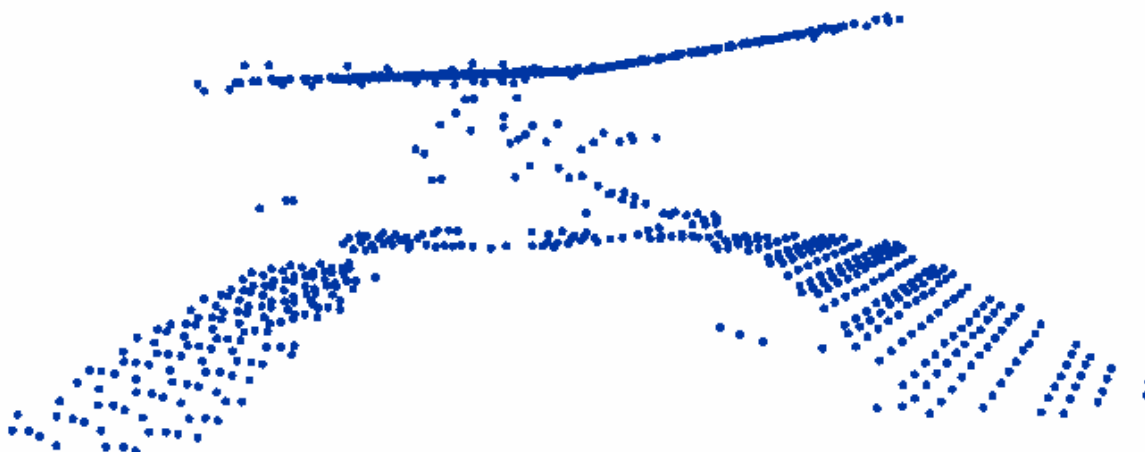
Při hustotě 1,5 bodů/m² byla nadmořská výška určena špatně jen dvakrát z celkového množství 29 budov. V prvním případě (budova sob23) činila odchylka od originálních bodů pouze necelé 2 dm a navíc byl uživatel na tuto chybu upozorněn. Chyba ve výšce byla u této budovy způsobena nestejně velkými rovinami sedlové střechy (Obr. 13). Algoritmus umísťuje sedlo automaticky do středu podle souřadnic rohů budovy. S tímto problémem si bohužel metoda prozatím nedokáže poradit. Z barevného ortofota nelze spolehlivě určit, zda jsou různě velké střešní plochy skutečné, nebo způsobené deformací vlivem středového promítání. Při velmi nízké hustotě mračna bodů pak není dost dobře možné polohu sedla určit ani z laserových dat.

Obr. 13: Laserové body (před zředěním) patřící budově sob23 a blízkému okolí. Sedlová střecha má nestejně velké roviny, a proto byla výška budovy určena nepřesně.



Zdroj: vlastní, grafické uživatelské rozhraní programu ArcView 9.2

Obr. 14: Laserové body (před zředěním) patřící budově sob43. Přestože jde o rovinnou střechu, dochází ve střední části k mírné změně sklonu, a proto byla výška budovy určena chybně.



Zdroj: vlastní, grafické uživatelské rozhraní programu ArcView 9.2

Ve druhém případě byl bohužel výsledek podstatně horší. Rozdíl zjištěné výšky a originálních bodů přesahoval 1 m. Poněvadž se jednalo o rovinnou střechu, jež má pouze jednu střešní rovinu, nebylo možné porovnat výšku uzlových bodů zjištěných z více rovin. Proto nebyl uživatel na tuto velkou chybu ani upozorněn.

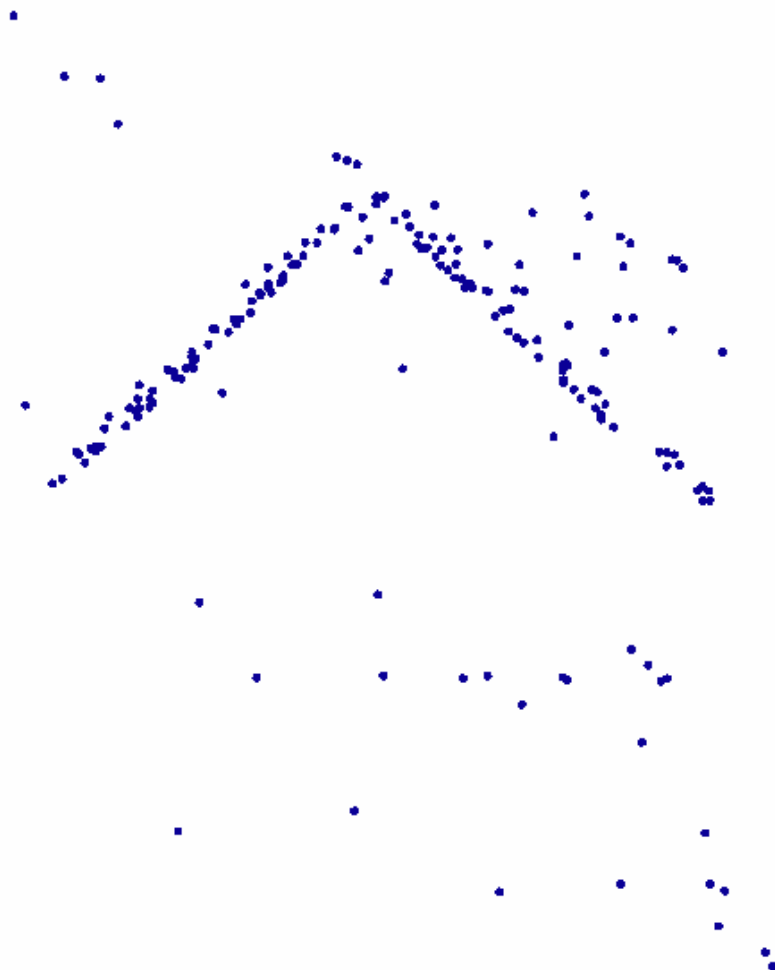
Střešní plášť budovy sob43 u kterého došlo k chybě skutečně spadá do kategorie rovinných střech, ačkoli má vlastně střešní roviny dvě. Ve střední části pláště totiž dochází k mírné změně sklonu roviny (Obr. 14). Při výpočtu polohy roviny byly body náležící části střechy s větším sklonem odstraněny jako příliš odlehle body. V seznamu zůstaly pouze body části střechy s menším sklonem a zjištěná výška budovy byla proto mnohem nižší než výška skutečná.

8.2.2 Řídké mračno laserových bodů

Přestože je hustota 0,25 bodů/m² pro určování výšky střech velmi malá, dosahovala navržená metoda i v tomto případě velmi dobrých výsledků. Z celkového množství 29 byla výška určena špatně pouze v pěti případech. Kromě dvou budov, u nichž došlo k chybě už při hustotě 1,5 bodů/m², se tedy nedostatečná hustota bodů projevila pouze u tří střešních plášťů. Kromě již zmíněné budovy sob43 nepřesahoval rozdíl výšek 0,5 m a uživatel byl navíc ve všech případech na chybu výpočtu upozorněn.

U budov brno4, sob18 (Obr. 15) a sob28 došlo k chybě vlivem velkého množství bodů, které dopadly na střešní vikýře i další objekty. Vlivem velkého zředění dat se pak na samotné střešní rovině vyskytovalo velmi málo bodů a její poloha nebyla určena zcela přesně.

Obr. 15: Laserové body (před zředěním) patřící budově sob18. Velké množství bodů dopadlo na vikýř na pravé střešní rovině. Část bodů zůstala také na komíně a větvích stromu po levé straně.

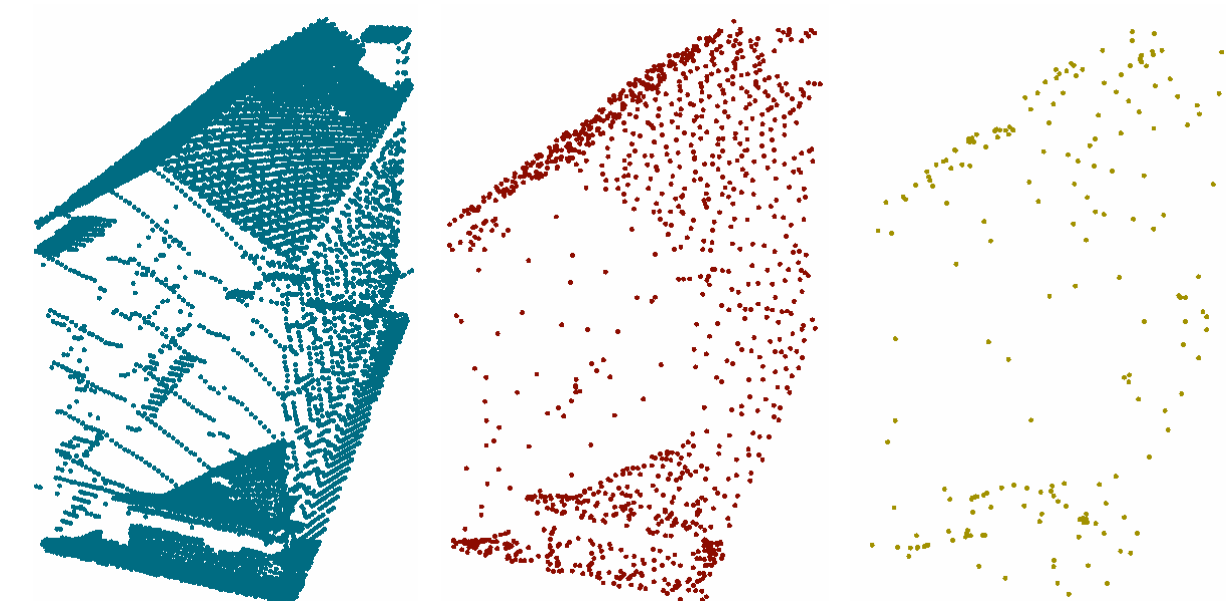


Zdroj: vlastní, grafické uživatelské rozhraní programu ArcView 9.2

8.2.3 Požadovaná hustota laserových bodů

Při určování minimální požadované hustoty mračka laserových bodů, při kterých by metoda podávala dostatečně přesné a spolehlivé výsledky, bylo provedeno testování na dvou různých hustotách vstupních dat. Při hustotě 1,5 bodů/m² došlo k chybě pouze ve dvou výjimečných případech s nimiž metoda prozatím nedokáže pracovat. Při velmi nízké hustotě 0,25 bodů/m² již došlo k většímu množství chyb právě vlivem nedostatečného množství bodů, které dopadly na střešní roviny. Přesto však byly výsledky stále velmi dobré. Lze předpokládat, že při dvojnásobné hustotě bodů (0,5 bodů/m²) budou výsledné výšky budov dostatečně přesné a spolehlivé. K ověření tohoto tvrzení by samozřejmě bylo vhodné provést další testování i pro ostatní hustoty bodů a na větším množství vzorových budov.

Obr. 16: Laserové body budovy brno1 a blízkého okolí s původní hustotou bodů přibližně 15 b/m^2 (vlevo), po zředění na hustotu $1,5 \text{ b/m}^2$ (uprostřed) a $0,25 \text{ b/m}^2$ (vpravo).



Zdroj: vlastní, grafické uživatelské rozhraní programu ArcView 9.2

8.3 Možnosti vylepšení

8.3.1 Detekce hran

Při určování typu střešního pláště docházelo nejčastěji k chybám vlivem nedokonalé detekce a následné úpravy hran ve výřezu ortofota. Pro získání spolehlivých výsledků je tedy nutné detekci hran vylepšit nebo alespoň částečně přenést úkol určení typu střechy na laserová data.

Při určování přesné polohy střešního pláště by bylo například možné pomocí známého obrysu budovy určit její orientaci. Z detekovaných hran by se poté odstranily všechny hrany, jež nejsou s určitou tolerancí rovnoběžné či kolmé k tomuto směru. Tím by se zvýšila šance na správné zjištění polohy střechy. Při určování samotného tvaru pláště není bohužel možné tento postup použít, neboť hrany střechy vedou při různých úhlech snímání různými směry.

Přesnějších výsledků by se pravděpodobně dalo dosáhnout také využitím ortofot s prostorovým rozlišením vyšším než $0,5 \text{ m}$, které byly použity pro testování metody. V tomto případě by ale asi bylo nutné použít i přesnější obrysy budovy, než mohou nabídnout digitální katastrální mapy. Navíc by se při vyšším rozlišení pravděpodobně objevil nový problém plynoucí z přesahu střešního pláště za obrys budovy. Při použitím rozlišení $0,5 \text{ m}$ byl vliv přesahu střechy zanedbatelný.

Pro zvýšení spolehlivosti určení typu střechy je možné využít také laserových dat. Hledání hran v nespojitém mračnu bodů není tak snadné jako v případě leteckých snímků. Nicméně pokud je tato hrana nalezena, máme jistotu, že se jedná skutečně o prostorový zlom a ne například o předěl mezi zastíněnou a nezastíněnou částí střechy. Detekcí prostorových zlomů, odpovídajících hranám střešního pláště, pomocí laserových dat se zabývá například HUBER et al. (2003) nebo JINHUI et al. (2004).

Navrhovaná metoda je primárně určena pro práce s velmi řídkým mračnem laserových bodů, na kterém by určování hran bylo velmi nespolehlivé. Nicméně množství bodů na jednotlivých budovách se značně liší. Například kvůli velikosti budov nebo proto, že se budova nachází na překrytovém území dvou snímaných pásů. Pokud by tedy příslušná budova obsahovala dostatečné množství bodů, mohlo by být laserových dat pro úpravu detekovaných hran využito.

8.3.2 Obrazová korelace

Pokud došlo při obrazové korelaci k chybnému určení typu střechy jednalo se nejčastěji o záměnu rovinné střechy za sedlovou. Naopak k záměně sedlové střechy za rovinnou nedošlo u žádné budovy. Tento výsledek byl způsoben pravděpodobně tím, že v případě sedlové střechy bylo s detekovanými hranami porovnáváno velké množství vzorů reprezentující různé náklony horní hrany střechy. Naopak u rovinné střechy byl ke korelaci použit pouze jeden vzor. Tuto nevýhodu by bylo možné vyrovnat přiřazením vyšší váhy koeficientu korelace rovinné střechy. Tím by se však problém zcela nevyřešil. Méně rovinných střech by bylo považováno za sedlové, ale naproti tomu by některé sedlové střechy byly zaměněny za rovinné.

Tento problém by bylo možné částečně vyřešit opět s pomocí laserových dat. I v případě velmi nízké hustoty mračna bodů lze poměrně snadno identifikovat budovy s plochou střechou. U nich se totiž v datové sadě nachází výrazně větší podíl bodů, jež mají téměř shodnou nadmořskou výšku. Pokud by k tomu došlo, byla by střecha považována za plochou. Určování typu střechy pomocí detekce hran výřezu ortofota by se dále používalo pouze pro střechy sedlové, valbové, jehlanové a šikmé.

8.3.3 Kontrola výšky rovinné střechy

Při kontrole přesnosti určených výšek byly správně odhaleny téměř všechny chyby, ke kterým došlo. Za potenciálně chybné bylo navíc označeno velké množství výšek, jež byly nakonec určeny velmi přesně. K těmto údajným chybám došlo téměř ve všech případech

vlivem nepřesného horizontálního umístění obrysu budovy v DKM vzhledem k laserovým datům. Pozice rovin byla určena velmi přesně, avšak poloha jejich průsečnice se lišila od polohy sedla získaného z obrysu budovy. Tím pádem se výška uzlových bodů v obou rovinách lišila o více než nastavenou prahovou hodnotu 0,5m a uživatel byl informován o možné chybě ve výpočtu výšky. Následným zprůměrnováním obou hodnot však byla nadmořská výška budovy určena velmi přesně. Nastavenou prahovou hodnotu 0,5m by tedy bylo možné pravděpodobně ještě zvýšit, aniž by došlo ke snížení spolehlivosti metody.

Naproti tomu u budovy sob43 nebyl uživatel na chybu upozorněn, přestože se výsledná výška lišila od originálních bodů o více než jeden metr. Tento problém může nastat pouze v případě rovinné střechy. Protože má jen jednu střešní rovinu, není možné porovnat výšky uzlových bodů z více zdrojů a případná chyba tak není odhalena. Tento problém by bylo možné částečně vyřešit porovnáním výšky dvou nejvyšších rohů. Bohužel tato kontrola by dokázala zachytit pouze chybné naklonění roviny napříč směru skutečného sklonu. Chybné určení sklonu samotného by nebylo kontrolou zjištěno. Navíc v případě, kdy by byla střecha skutečně ukloněná šikmo ke dvěma stěnám budovy, byl by uživatel o chybě informován nesprávně. Takovýto typ střešního pláště se však u nás téměř nevyskytuje.

8.4 Zhodnocení metody

8.4.1 Splnění hodnotících kritérií

HOFMANN (2005) shrnuje pět kritérií, která by měl splňovat dobrý, v praxi využitelný systém. Tato kritéria jsou podrobně zpracována v kapitole 3.2. Je to zejména univerzálnost a flexibilita systému, detailnost modelu, přesnost a spolehlivost výsledků a v neposlední řadě i doba výpočtu. Při návrhu nové metody byl kladen důraz zejména na vysoký stupeň automatizace, která by značně urychlila dobu zpracování dat. Dále bylo nutné, aby byl systém dostatečně flexibilní a výsledky přesné a spolehlivé. Vzhledem k tomu, že výstupem celého postupu je údaj o typu střešního pláště a nadmořské výšce vrchního bodu budovy, nebylo nutné, aby metoda byla příliš detailní a univerzální.

Požadavek na vysoký stupeň automatizace se splnit podařilo. Pracovní postup celého systému byl zpracován tak, že funguje zcela automaticky. Přítomnost uživatele je vyžadována pouze pro kontrolu a případnou opravu výsledků, které byly označeny za potenciálně chybné.

Flexibilita určuje přizpůsobivost systému různému typu vstupních dat. Nevýhodou tohoto systému je nutnost práce se třemi typy dat: DKM, barevná ortofota a body ALS. Na druhou

stranu se podařilo splnit požadavek na potřebu velmi nízkého mračna laserových bodů. V tomto ohledu se tedy požadavek na flexibilitu systému podařilo rovněž splnit.

O přesnosti výsledků se dá hovořit pouze v případě nadmořské výšky budov. Také v tomto případě bylo dosaženo velmi dobrých výsledků. Zjištěná výška se ve většině případů nelišila od originálních bodů o více než nastavenou prahovou hodnotu 1dm.

Spolehlivost metody je pro určení typu střešního pláště a výšky budov různá. V prvním případě bohužel nejsou získané výsledky příliš spolehlivé. Správně identifikovat tvar střechy se podařilo pouze ve 33 případech z celkových 50 budov (66 %). Téměř polovinu chyb se navíc nepodařilo identifikovat. Ve výsledku by tedy byla velká část střešních plášťů určena špatně, aniž by o tom měl uživatel tušení. V kapitole 8.3 bylo navrženo několik možných řešení, která by měla vést ke zvýšení spolehlivosti této části postupu.

Ve druhé části práce, v níž byly zjišťovány nadmořské výšky budov, byly dosažené výsledky naopak velmi spolehlivé. K chybnému určení výšky došlo jen zřídka. Kromě jednoho případu pak byly tyto chyby vždy odhaleny. V případě rovinných budov, u kterých metoda v současné době nemá kontrolní mechanismus pro odhalení chyby, bylo navrženo možné zlepšení.

8.4.2 Využitelnost metody v praxi

Přestože se podařilo splnit většinu požadavků stanovených na počátku práce, celkové výsledky nejsou v současné době ještě dostatečně spolehlivé a navržená metoda prozatím není připravena pro praktické využití. Začleněním některého z navržených zlepšení by bylo možné tento nedostatek z velké části odstranit.

Kromě nízké spolehlivosti brání použití metody rovněž absence možnosti modelovat složitější komplexy budov. Pro určení parametrů těchto staveb by bylo nutné do postupu začlenit i segmentaci složitějších obrysů budov do základních tvarů. Tato část postupu nebyla z časových důvodů do práce začleněna. Také v tomto případě se jedná sice o obtížný, avšak neřešitelný problém.

Pravděpodobně ani po odstranění výše zmíněných problémů nebude metoda patřit k rozšířeným a hojně využívaným postupům. I nadále totiž nebude možné s její pomocí vytvářet detailní modely budov s mnoha různými tvary střešního pláště. Přesto díky vysokému stupni automatizace a zejména možnosti práce i s velmi řídkým mračnem laserových bodů může navržená metoda najít v praxi své uplatnění. Jedním z potenciálních uživatelů by se mohl stát například Odbor správy ZABAGED, na jehož popud tato metoda vznikla a jehož požadavky se podařilo z velké části splnit.

9 Závěr

Hlavní cíle této práce byly dva. Prvním z nich bylo teoretické zhodnocení existujících metod z dat laserového skenování a leteckých měřických snímků. Ve druhé praktické části práce bylo stanoveno za cíl navrhnout vlastní metodu modelování budov. Hlavními požadavky na novou metodu byly zejména maximální stupeň automatizace postupu a možnost pracovat i s velmi řídkým mračenem laserových bodů.

Vstupními daty nové metody byly kromě laserových bodů i barevná ortofota a obrysy budov získané z digitálních katastrálních map. Výstupem celé metody je pak údaj o typu střešního pláště a nadmořské výšce budovy. Výškou budovy se pro účel této práce rozumí výška nejvyšší hrany, resp. bodu střešního pláště.

V první fázi postupu byly pomocí vektorových obrysů budovy DKM vyříznuty části ortofota obsahující střechu budovy. Pomocí hranového operátoru byly ve výřezu detekovány hrany střešního pláště. Poněvadž výsledný obraz obsahoval i velké množství nepatřičných hran okolních objektů, stínů apod., byla dalšími úpravami většina špatných hran odstraněna. Budova ve vektorové podobě získaná z DKM byla dále převedena na rastr obsahující obrys budovy. Korelací obou výsledných obrazů byla určena přesná poloha střešního pláště ve výřezu ortofota.

Při znalosti obrazových souřadnic střechy budovy bylo možné přejít k určení typu střešního pláště. Protože cílem práce bylo vytvoření metody pracující s řídkým mračenem laserových bodů, byl zvolen postup řízený modelem. Určované základní typy střech byly čtyři: rovinná, sedlová, valbová a jehlanová. Ze známých rohů budov byly vytvořeny vzory střech a obrazovou korelací s detekovanými hranami byl určen nejpravděpodobnější tvar střechy. Pokud byl vypočítaný koeficient korelace příliš nízký nebo se nejvyšší hodnoty dvou typů příliš podobaly, byl uživatel upozorněn na vysokou pravděpodobnost chybného určení typu střechy.

V poslední části byla vypočítána výška střechy z dat laserového skenování. Z prostorových souřadnic bodů jednotlivých střešních rovin byly na základě metody nejmenších čtverců vypočítány obecné rovnice rovin. Dosazením polohy koncových bodů nejvyšší hrany byla určena jejich výška. Průměr těchto hodnot udával i výslednou výšku budovy. Pokud se hodnoty výšek bodů od sebe lišily o více než 0,5 m, byl uživatel upozorněn na pravděpodobnou chybu ve výpočtu.

Navržená metoda byla testována na reálných datech z oblasti Brna a Sobotky. Z celkového množství 50 budov byl tvar střešního pláště správně určen na 33 budovách. Ve zbývajících

17 případech byl uživatel devětkrát na chybu upozorněn. V osmi případech nebyla chyba ve výsledku odhalena.

Při určování výšky bylo testováno 29 budov. Výpočet probíhal nejprve na relativně hustém mračnu laserových bodů ($1,5 \text{ bodů/m}^2$), poté na velmi nízké hustotě $0,25 \text{ bodů/m}^2$. Za správně určenou byla považována výška, která se od originálních bodů nelišila o více než 0,1 m. Správného výsledku bylo dosaženo v prvním případě u 27 budov. Ve druhém případě se již projevilo nedostatečné množství laserových bodů a výška byla určena správně u 24 budov. Až na jediný případ byl uživatel na chybu výpočtu vždy upozorněn. Minimální hustota laserových bodů, při kterých metoda podává přesné a spolehlivé výsledky, byla stanovena na $0,5 \text{ bodů/m}^2$.

Po zhodnocení výsledků bylo zjištěno, že se při tvorbě nové metody podařilo splnit požadavky na vysoký stupeň automatizace procesu, možnost práce i s velmi řídkým mračnem laserových bodů a vysokou přesnost výsledků. Požadavek na vysokou spolehlivost výsledků se podařilo splnit jen částečně. Druhá část metody, při níž je určována výška budov, je velmi spolehlivá. Naproti tomu spolehlivost určování typu střešního pláště je nedostatečná. Bylo však navrženo několik možných řešení, která by měla tento nedostatek z velké části odstranit. Domnívám se, že po úpravě těchto chyb najde metoda, díky vysokému stupni automatizace a zejména možnosti práce i s velmi řídkým mračnem laserových bodů, své uplatnění v praxi.

Kromě požadavku na vysokou spolehlivost výsledné metody se podařilo splnit všechny hlavní i vedlejší cíle práce.

10 Použitá literatura a zdroje

10.1 Literatura

BRENNER, C. Towards fully automatic generation of city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, vol. 34, part B3, s. 169–174. Dostupné z: www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2000/Brenner_amsterdam.pdf.

FLAMANC, D. et al. 3d city models: An operational approach using aerial images and cadastral maps. In *Photogrammetric Image Analysis*. Ebner, H. et al., ISPRS, Munich, Germany, 2003. s. 53-58. Dostupné z: http://www.commission3.isprs.org/pia/papers/pia03_s2p2.pdf

GÜLCH, E., MÜLLER, H., LÄBE, T. Integration of automatic processes into semi-automatic building extraction. *International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, vol. 32, part 3-2W5, s. 177–186. Dostupné z: <http://www.ipb.uni-bonn.de/papers/1999/guelch99.integration.pdf>

HAALA, N. et al. 3D urban GIS from laser, altimeter and 2D map data. *International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998a, vol. 32, part 3, s. 339-346. Dostupné z: http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/1998/ohio_laser.pdf

HAALA, N. et al. An integrated system for urban model generation. *International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998b, vol. 32, part 2, s. 96-103. Dostupné z: http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/26073/http:zSzzSzwww.ifp.uni-stuttgart.de/publicationszSz1998zSzcommII_laser.pdf/haala98integrated.pdf.

HAALA, N., BRENNER, C. Generation of 3D city models from airborne laser scanning data. In *Proceedings EARSEL Workshop on LIDAR remote sensing on land and sea*. Tallinn, Estonia, July 1997, s. 105-112. Dostupné z: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/1997/tallin.pdf>

HAALA, N., BRENNER, C. Fast production of virtual reality city models. In *Proceedings ISPRS Comm. IV Symposium "GIS between Visions and Applications"*. IAPRS. Stuttgart, 1998, vol. 32, part 4, s. 77–84. Dostupné z: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/commIV/brenner3.pdf>

HAALA, N., BRENNER, C. Extraction of buildings and trees in urban environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 1999, vol. 54, s. 130-137. Dostupné z: http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/1999/norbert_isprsjourn.pdf

HAMPACHER, M., RADOUCH, V. Teorie chyb a vyrovnávací počet 10. Lektor Josef Weigel. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. 159 s. ISBN 80-01-01704-4.

HOFMANN, A. D. *An approach to 3D building model reconstruction from airborne laser scanner data using parameter space analysis and fusion of primitives*. Dresden, 2005. 109 s. Disertační práce, Technische Universität Dresden. Fakultät Forst- Geo- und Hydrowissenschaften. Dostupné z: http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=976589990&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=976589990.pdf

HUBER, M. et al. Fusion of LIDAR Data and Aerial Imagery for Automatic Reconstruction of Building Surfaces [online]. *2nd Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*. Berlin, Germany, May 2003. [cit. 12. 5. 2008]. Dostupné z: http://www.sanborn.com/Pdfs/Article_Fusion_of_Lidar_Schickler.pdf

JINHUI, H. et al. Building modeling from LIDAR and aerial imagery [online]. 2004. [cit. 12. 5. 2008]. Dostupné z: <http://graphics.usc.edu/cgit/pdf/papers/ASPRS.pdf>

KAARTINEN et al. Accuracy of 3D city models - EuroSDR comparison. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2005, vol. 36, part 3, s. 227-232. Dostupné z: <http://www.commission3.isprs.org/laserscanning2005/papers/227.pdf>

MAAS, H. G. Closed solutions for the determination of parametric building models from invariant moments of airborne laserscanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999a, vol. 32, part 3-2W5, s. 193-199. Dostupné z: http://www.tu-dresden.de/fghgipf/forschung/material/publ_maas/Maas_Munich99.pdf

MAAS, H. G. Fast determination of parametric house models from dense airborne laserscanner data. [online]. 1999b. [cit. 12. 5. 2008]. Dostupné z: <http://internationalisation.ewi.tudelft.nl/live/binaries/3666d89e-a329-4c97-8d59-13d30c96b34e/doc/Maasdetermination.pdf>

MAAS, H. G. The suitability of airborne laser scanner data for automatic 3D object reconstruction [online]. *3rd International Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*. Ascona, Switzerland, June 2001. [cit. 12. 5. 2008]. Dostupné z: http://www.tu-dresden.de/ipf/photo/publikationen/aeltere/Maas_Ascona2001.pdf

MAAS, H. G., VOSELMAN, G. Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, vol. 54, s. 153-163. Dostupné z: <http://welcome.warnercnr.colostate.edu/~lefsky/isprs/1129.pdf>

MAILLET, G., FLAMANC, D. Comparison of aerial images, satellite images and laser scanning dsm in a 3D city models production framework. In *XXth ISPRS Congress. Istanbul*. 2004, vol. 35, part B3. Dostupné z: <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm3/papers/447.pdf>

MOONS, T. et al. Automatic modeling and 3D reconstruction of urban house roofs from high resolution seriál imagery. *Proceedings of the 5th European Conference on Computer Vision*, 1998, vol. I, s 410-425.

PIKHARTOVÁ, L. *Analýza metod modelování zástavby z dat laserového skenování*. Praha, 2007. 113 s. Diplomová práce, Univerzita Karlova v Praze. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. Vedoucí diplomové práce Ing. Markéta Potůčková, PhD.

SCHENK, T., CSATHÓ, B. Fusion of LIDAR data and aerial imagery for a more complete surface description. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2002, vol. 24, part 3A, s. 310-317. Dostupné z: <http://www.isprs.org/commission3/proceedings02/papers/paper179.pdf>

SCHWALBE, E., MAAS, H. G., SEIDEL, F. 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections [online]. *Proceedings of the ISPRS Workshop Laser scanning 2005*, Enschede, Netherlands, September 2005. [cit. 12. 5. 2008]. Dostupné z: <http://www.commission3.isprs.org/laserscanning2005/papers/209.pdf>

VOSSELMAN, G. Building reconstruction using planar faces in very high density height data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, vol. 32, part 3-2W5, s. 87-92. Dostupné z: www.itc.nl/personal/vosselman/papers/vosselman1999.munich.pdf

VOSSELMAN, G. Fusion of Laser Scanning Data, Maps and Aerial Photographs for Building Reconstruction [CD-ROM]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and the 24th Canadian Symposium on Remote Sensing*. IGARSS'02, Toronto, Canada, June 24-28, 4 s. Dostupné z: <http://www.itc.nl/personal/vosselman/papers/vosselman2002.igarss.pdf>

VOSSELMAN, G., DIJKMAN, S. T. 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, vol. 34, part 3-W4, s. 37-44. Dostupné z: <http://www.isprs.org/commission3/annapolis/pdf/Vosselman.pdf>

VOSSELMAN, G., SUVEG, I. Map based building reconstruction from laser data and images. In *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Satellite Images (III)*. Baltsavias, E. P., Gruen, A., Gool, L. Van. Lisse. Netherlands: Swets & Zeitlinger Publishers, 2001, s. 231-239.

WANG, L. Object-oriented model based 3D building extraction using airborne laser scanning points and aerial imagery [online]. 2007. [cit. 12. 5. 2008]. Dostupné z: http://www.itc.nl/library/papers_2007/msc/gfm/langyue.pdf

10.2 Internetové stránky

ARCDATA PRAHA. Software pro práci s daty ISKN [online]. c2007, [cit. 12.6.2008].
Dostupné z: <http://www.arcdata.cz/>

Data East. XTools Pro - extension for ArcGIS [online]. c2007, [cit. 12.6.2008]. Dostupné z:
<http://www.xtoolspro.com/>

Český úřad zeměměřický a katastrální [online]. poslední revize 12.05.2008 [cit. 12.6.2008].
Dostupné z: <http://www.cuzk.cz/>

KOVESI, P. D. Peter's Functions for Computer Vision [online]. c2000, [cit. 21.6.2008].
Dostupné z: <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/Research/MatlabFns/>

PTÁČEK, P. Pozemní stavitelství [online]. c2002-2004, [cit. 27.7.2008]. Dostupné z:
<http://www.pozemni-stavitelstvi.wz.cz/pos72.php>

Seznam zkratek

ALS	- Airborne laser scanning (Letecké laserové skenování)
ČÚZK	- Český úřad zeměměřický a katastrální
DKM	- Digitální katastrální mapa
DMT	- Digitální model terénu
DMP	- Digitální model povrchu
DPZ	- Dálkový průzkum Země
GIS	- Geografický informační systém
JTSK	- Jednotná trigonometrická síť katastrální
KK	- Koeficient korelace
LMS	- Letecké měřické snímky
MNČ	- Metoda nejmenších čtverců
TIN	- Triangulated irregular network (Nepravidelná trojúhelníková síť)
UTM	- Universal transverse mercator (Mercatorovo příčné univerzální zobrazení)
WGS84	- World geodetic systém 1984 (Světový geodetický systém 1984)
ZABAGED	- Základní báze geografických dat
ZÚ	- Zeměměřický úřad

Seznam obrázků

OBR. 1: SCHÉMA POSTUPU ZPRACOVÁNÍ	35
OBR. 2: VYTVOŘENÍ VZOROVÉHO OBRAZU Z OBRYSU BUDOVY	37
OBR. 3: POSUN STŘEŠNÍHO PLÁŠTĚ VŮČI PŮDORYSU BUDOVY A VÝŘEZ ČÁSTI ORTOFOTA S BUDOVOU	38
OBR. 4: SPOJENÍ NÁSTROJŮ PRO ÚPRAVU DKM POMOCÍ APLIKACE MODEL BUILDER	39
OBR. 5: OBRAZ DETEKOVANÝCH HRAN PŘI NASTAVENÍ NÍZKÉ A VYSOKÉ CITLIVOSTI HRANOVÉHO OPERÁTORU	42
OBR. 6: PŮVODNÍ BUDOVA VE VÝŘEZU BAREVNÉHO ORTOFOTA A VÝSLEDNÝ OBRAZ UPRAVENÝCH DETEKOVANÝCH HRAN	42
OBR. 7: ZÁKLADNÍ TYPY STŘECH	44
OBR. 8: MRAČNO LASEROVÝCH BODŮ STŘEŠNÍ ROVINY, DO KTERÉHO BYLY ZAŘAZENY I BODY LEŽÍCÍ NA OKOLNÍCH STROMECH ČI STĚNÁCH BUDOVY.	47
OBR. 9: VÝŘEZ BAREVNÉHO ORTOFOTA A OBRAZ UPRAVENÝCH DETEKOVANÝCH HRAN BUDOVY SOB38.	55
OBR. 10: VÝŘEZ BAREVNÉHO ORTOFOTA A OBRAZ UPRAVENÝCH DETEKOVANÝCH HRAN BUDOVY SOB36	56
OBR. 11: VÝŘEZ BAREVNÉHO ORTOFOTA A OBRAZ UPRAVENÝCH DETEKOVANÝCH HRAN BUDOVY SOB19	57
OBR. 12: OBRYSY BUDOV ZÍSKANÉ Z DKM	57
OBR. 13: LASEROVÉ BODY (PŘED ZŘEDĚNÍM) PATŘÍCÍ BUDOVĚ SOB23 A BLÍZKÉMU OKOLÍ	59
OBR. 14: LASEROVÉ BODY (PŘED ZŘEDĚNÍM) PATŘÍCÍ BUDOVĚ SOB43	59
OBR. 15: LASEROVÉ BODY (PŘED ZŘEDĚNÍM) PATŘÍCÍ BUDOVĚ SOB18	61
OBR. 16: LASEROVÉ BODY BUDOVY BRNO1 A BLÍZKÉHO OKOLÍ S PŮVODNÍ HUSTOTOU BODŮ PŘIBLIŽNĚ 15 B/M ² , PO ZŘEDĚNÍ NA HUSTOTU 1,5 B/M ² A 0,25 B/M ²	62

Seznam tabulek

TAB. 1: VÝSLEDKY URČOVÁNÍ TYPU STŘEŠNÍHO PLÁŠTĚ	52
TAB. 2: VÝSLEDKY URČOVÁNÍ NADMOŘSKÉ VÝŠKY BUDOV	54

Seznam příloh

Příloha 1: Popis funkcí určení typu střešního pláště

Příloha 2: Popis funkcí určení výšky budovy

Volná příloha: CD-ROM

Přílohy

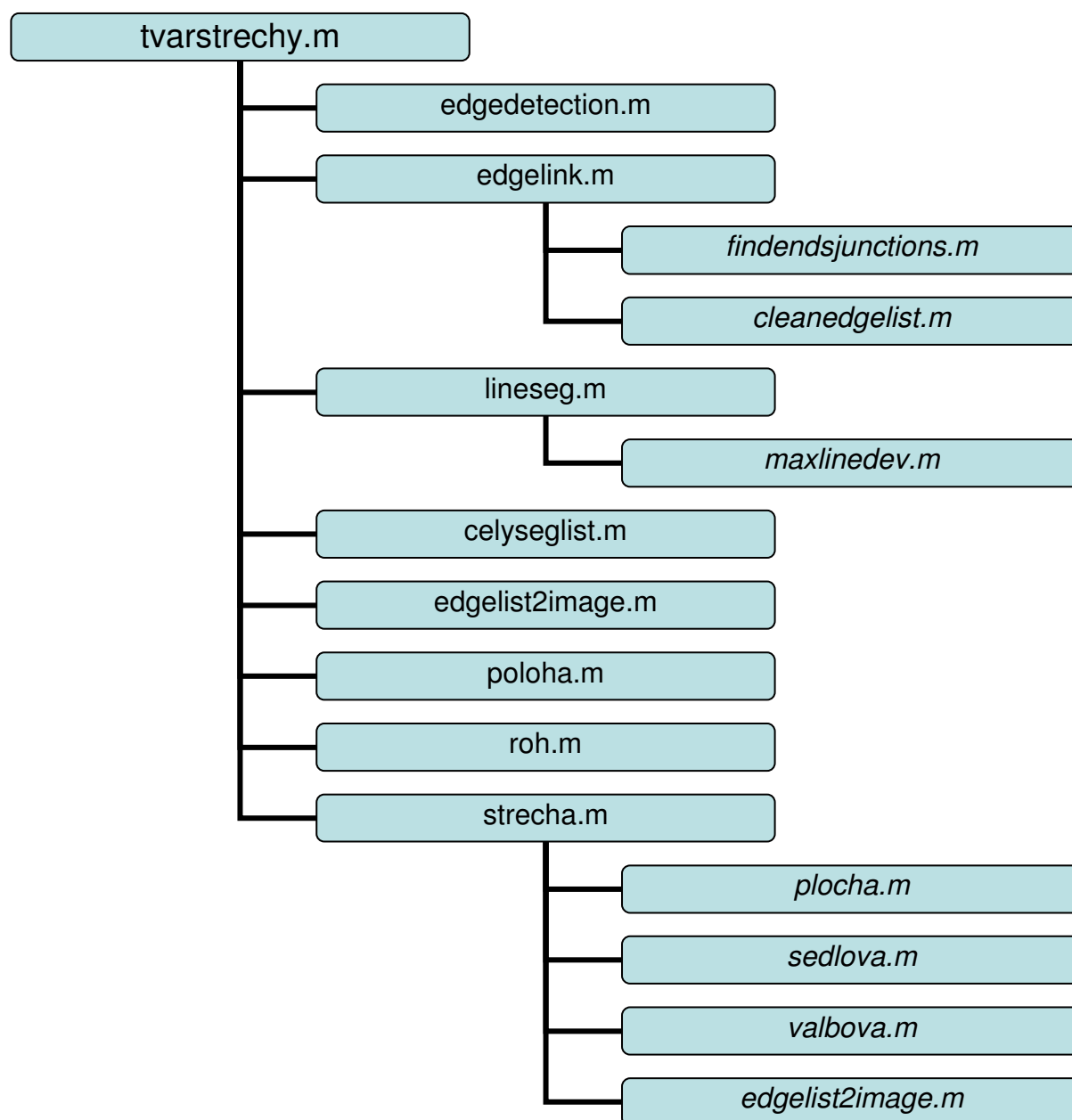
Příloha 1: Popis funkcí určení typu střešního pláště

Celý algoritmus proběhne zavoláním hlavní funkce *tvarstrechy.m*. Popis jednotlivých funkcí je řazen podle jejich návaznosti v algoritmu.

Volání funkcí

[hranypuv, hranyupr, kkpohy, max, pozice, kkstrechy, typ, chyba] =
tvarstrechy('brno1_obraz.bmp', 'brno1_vzor.bmp');

Schéma návaznosti funkcí



tvarstrechy.m

Autor: Petr Hofman

Vytvořena: 2.6.2008

Popis:

Funkce tvořící základ algoritmu pro určení typu střešního pláště. Postupně volá jednotlivé funkce pro detekci hran, úpravu nalezených hran, určení přesné polohy budovy a konečně určení nejpravděpodobnějšího typu střešního pláště budovy.

Vstupy:

orto - Výřez barevného ortofota s budovou.

vzor - Rastr obsahující obrys budovy.

Výstupy:

edgeim - Obraz s původními detekovanými hranami.

hrany - Obraz s upravenými hranami.

kkpolohy - Matice koeficientů korelace určující nejpravděpodobnější polohu obrysu střechy budovy.

max – Maximální výsledná hodnota KK z matice kkpolohy.

pozice - Obrazové souřadnice (y, x) polohy levého horního rohu vzorového obrazu na detekovaném obraze.

kkstrechy - Matice KK určující nejpravděpodobnější tvar střešního pláště.

typ - Nejpravděpodobnější tvar střešního pláště: rovinná (1), sedlováLP (2), sedlováHD (3), valbová (4), jehlanová (5).

chyba - Parametr určující, zda při určování tvaru střešního pláště došlo pravděpodobně k chybě (1), či ne (0).

edgedetection.m

Autoři: Jeny Rajan, P. S. Chandrashekar

Úprava: Petr Hofman

Popis:

Funkce provede detekci hran obrazu pomocí canny operátoru s předem nastavenými parametry. Pokud se jedná o barevný obraz, je nejdříve pomocí zabudované funkce *rgb2ycbcr* převeden z barevného modelu RGB na model YCbCr. Na první pásmo tohoto modelu se poté aplikuje canny operátor a obraz je pomocí funkce *ycbcr2rgb* převeden zpět do modelu RGB. Výsledný obraz se třemi stejnými pásmy je nakonec převeden na jednopásmový rastr.

Provedené změny:

Pro potřeby diplomové práce byly u canny operátoru zadány vlastní hodnoty parametrů nejlépe vyhovující potřebám navržené metody. Prahová hodnota pro slabé hrany byla nastavena na 0,08, prahová hodnota pro silné hrany na 0,16 a hodnota σ na 0,3. Výsledný obraz se třemi stejnými pásmy byl převeden na jednopásmový rastr.

Vstup:

title – Název obrazu určeného k detekci hran. Obraz může být černobílý (jednopásmový), či barevný (třípásmový). Parametr je nutné zadat ve formě názvu souboru a formátu. V případě, že se obraz nenachází ve stejné složce se souborem funkce *poloha.m*, je nutné zadat i cestu k obrazu.

Výstup:

edgeim – Rastr obsahující detekované hrany. Jednopásmový obraz nabývá hodnot 255 (hrana) a 0 (zvývajících pixely).

edgelist.m

Autor: Peter Kovesi

Popis:

Funkce v obrazu vyhledává pixely náležející detekovaným hranám. Postupně prochází jednotlivé oddělené skupiny pixelů. Pokud počet bodů v této skupině dosahuje minimální hodnoty určené parametrem *minlength*, je pozice těchto pixelů uložena v seznamu hran *edgelist*. Pokud počet bodů nedosahuje potřebné délky, je ze seznamu vypuštěn.

Pro nalezení koncových bodů a bodů ležících na křížení hran volá funkci *findendsjunctions.m*. Pro odstranění příliš krátkých hran volá funkci *cleanedgelist.m*.

Vstup:

im – Název obrazu obsahujícího detekované hrany. Parametr je nutné zadat ve formě názvu souboru a formátu. V případě, že se obraz nenachází ve stejné složce se souborem funkce *poloha.m*, je nutné zadat i cestu k obrazu.

minlength (volitelný parametr) – Skalár, jehož hodnota určuje minimální délku hrany, která má být vložena do seznamu hran. V případě že jeho hodnota není zadána, je minimální délka nastavena na hodnotu 1. Pro potřeby této práce byl parametr nastaven na hodnotu 6.

location (volitelný parametr) – Rastr obsahující pozice pixelů detekovaných hran. Tento volitelný parametr nebyl pro potřeby práce zadán.

Výstup:

edgelist – Seznam (počet buněk závisí na počtu hran), v němž každá buňka obsahuje obrazové souřadnice pixelů náležících jedné hraně. Seznam obsahuje pouze hrany, jejichž délka dosahuje minimální délky určené parametrem *minlength*.

edgeim – Obraz obsahující detekované hrany. Na rozdíl od vstupního obrazu *im* však pixely náležící hranám nenabývají libovolných kladných hodnot. Hodnoty pixelů jednotlivých hran odpovídají pořadí nalezených hran. Na rozdíl od parametru *edgelist* obsahuje i hrany, které nedosahují minimální nastavené délce *minlength*.

findendsjunctions.m

Autor: Peter Kovesi

Popis:

Tato funkce je volána za běhu funkce *edgelist.m*. Funkce v první řadě zabudovanou funkcí *bwmorph* ztenčí detekované hrany na šířku jednoho pixelu. Jinak by mohl algoritmus zjišťující jejich délku selhat. Poté funkce vyhledává křížení hran pomocí prozkoumávání nejbližšího okolí jednotlivých pixelů. Pokud se v okolí bodu nachází alespoň dvě dvojice protilehlých pixelů náležících hraně, jedná se o křížení hran. Podobným způsobem jsou nalezeny i koncové body hran.

Vstup:

edgeim – Název obrazu obsahujícího detekované hrany.

disp (volitelný parametr) – Parametr určuje, zda má být za běhu funkce vykreslen obraz detekovaných hran s vyznačenými koncovými body a body ležícími na křížení hran (1), nebo ne (0). Pokud není hodnota zadána, je nastavena na 0. V této práci nebyl parametr zadán.

Výstup:

rj, *cj* – Vektory obsahující řádkové (*rj*) a sloupcové (*cj*) souřadnice pixelů ležících na křížení hran. Délka vektorů závisí na počtu bodů.

re, *ce* – Vektory obsahující řádkové (*re*) a sloupcové (*ce*) souřadnice pixelů ležících na koncích hran. Délka vektorů závisí na počtu bodů.

cleanedgelist.m

Autor: Peter Kovesi

Popis:

Tato funkce je volána za běhu funkce *edgelist.m*, která jí předá hodnotu určující minimální délku hran *minlength* a seznam hran *edgelist*. Tento seznam dosud obsahuje všechny hrany včetně těch, které nedosahují potřebné délky. Funkce postupně prochází celý list a příliš krátké hrany odstraňuje.

Vstup:

edgelist - Seznam (počet buněk závisí na počtu hran), v němž každá buňka obsahuje obrazové souřadnice pixelů náležících jedné hraně. Seznam obsahuje všechny hrany včetně těch, které nedosahují potřebné délky.

minlength - Skalár, jehož hodnota určuje minimální délku hrany, která má být vložena do seznamu hran.

Výstup:

nedgelist - Seznam (počet buněk závisí na počtu hran), v němž každá buňka obsahuje obrazové souřadnice pixelů náležících jedné hraně. Tento nový, „vyčištěný“ seznam obsahuje pouze hrany, jejichž délka dosahuje minimální délky určené parametrem *minlength*.

lineseg.m

Autor: Peter Kovesi

Popis:

Hrany nalezené funkcí *edgelist.m* často obsahují různé křivky, které většinou nejsou součástí hran střešního pláště. Tato funkce postupně prochází seznam bodů každé hrany. Pokud odchylka polohy některého bodu od linie spojující koncové body překračuje prahovou hodnotu, je hrana rozdělena na dvě. Místo zlomu je určeno bodem s maximální odchylkou. Poté je test opakován až do doby, kdy žádný bod nepřekračuje prahovou hodnotu vzdálenosti. Nově získané koncové a zlomové body jsou uloženy do výsledného listu.

Pro nalezení maximální odchylky bodu od přímé linie volá funkci *maxlinedev.m*.

Vstup:

edgelist - seznam (počet buněk závisí na počtu hran), v němž každá buňka obsahuje obrazové souřadnice pixelů náležících jedné hraně. Tento seznam by už měl obsahovat pouze hrany, jejichž délka dosahuje minimální povolené délky.

tol – Skalár, jehož hodnota určuje maximální povolenou odchylku pixelu od přímé linie spojující koncové body hrany. Pro potřeby práce byla jeho hodnota nastavena na 2.

Výstup:

seglis - Seznam (počet buněk závisí na počtu úseků), v němž každá buňka obsahuje obrazové souřadnice pixelů tvořících koncové body nových přímých úseků.

maxlinedev.m

Autor: Peter Kovesi

Popis:

Tato funkce je volána za běhu volající funkce *lineseg.m*. Postupně prochází body náležící jedné hraně a vyhledává bod s maximální odchylkou od přímé linie spojující první a poslední bod.

Vstup:

x, *y* – Vektory obsahující obrazové souřadnice bodů náležící prohledávané hraně.

Výstup:

maxdev – Skalár, jehož hodnota určuje odchylku pixelu s maximální odchylkou od přímé linie spojující koncové body hrany.

index – Skalár určující pořadí bodu s maximální odchylkou.

D – Skalár určující vzdálenost mezi koncovými body hrany.

totaldev – Skalár. Součet vzdáleností všech pixelů od přímé linie spojující koncové body hrany.

celyseglis.m

Autor: Petr Hofman

Vytvořeno: 10.5.2008

Popis:

Funkce převádí seznam obsahující koncové body přímých úseků na seznam obsahující celé liniové úseky. Pro každé dva koncové body vypočítá parametry obecné rovnice přímky v rovině. Postupně pak prochází všechny pixely ležící v minimax boxu těchto koncových bodů. Pokud se zkoumaný bod nachází do vzdálenosti poloviny velikosti pixelu od přímky procházející koncovými body, je tento bod součástí hledaného liniového úseku a je uložen do výsledného seznamu – *celylist*.

Nedostatky a možnost vylepšení:

Vstup:

seglis - Seznam (počet buněk závisí na počtu úseků), v němž každá buňka obsahuje obrazové souřadnice pixelů tvořících koncové body přímých úseků detekovaných hran.

Výstup:

celylist - Seznam (počet buněk závisí na počtu úseků), v němž každá buňka obsahuje obrazové souřadnice všech pixelů tvořících přímé úseky detekovaných hran.

edgelis2image.m

Autoři: Peter Kovesi

Úprava: Petr Hofman

Popis:

Funkce převede seznam obsahující obrazové souřadnice pixelů ze na rastr. Každému pixelu, ze seznamu je přiřazena hodnota 255. Ostatní pixely mají hodnotu 0. Velikost výsledného rastru je převzata z velikosti původního obrazu.

Provedené změny:

Původní funkce vytvořila výsledný rastr podle velikosti zadané uživatelem. Pro potřeby diplomové práce je velikost převzata z velikosti původního obrazu.

Pixely ze seznamu nabývaly v původní funkci hodnoty 1. Pro snadnější porovnání obrazu se vzorem byla tato hodnota změněna na 255.

Vstup:

edgelis – Seznam (počet buněk odpovídá počtu hran) obsahující obrazové souřadnice pixelů.

edgem – Název obrazu, podle něhož se převezme velikost výsledného rastru. Parametr je nutné zadat ve formě názvu souboru a formátu. V případě, že se obraz nenachází ve stejné složce se souborem funkce *poloha.m*, je nutné zadat i cestu k obrazu.

Výstup:

longedge – Rastr vytvořený ze seznamu bodů. Body obsažené v seznamu nabývají hodnoty 255. Ostatní pixely mají hodnotu 0.

poloha.m

Autor: Petr Hofman

Vytvořena: 12.5.2008

Popis:

Funkce hledá přesnou polohu budovy ve výřezu ortofota pomocí porovnání obrazů. Jako vzor je použit obraz obrysu budovy získaný z DKM. Vzor je posouván po obraze pixel po pixelu a pro každou polohu je vypočítán korelační koeficient. Místo s nejvyšším KK určuje nejpravděpodobnější přesnou polohu střechy budovy na ortofotu.

Kromě výsledné polohy a KK, je výsledkem funkce i počet poloh s relativně vysokou hodnotou KK (hodnoty, které jsou max. o 10% nižší než maximální hodnota).

Nedostatky a možnost vylepšení:

Uživatel by měl mít možnost zadat prahovou hodnotu (defaultně 10%). Pokud by se hodnota jednoho nebo více KK přiblížila k maximální hodnotě na rozdíl menší než prahová hodnota, ohlásil by algoritmus možnost chybného určení polohy. Uživatel by pak měl možnost manuálně určit polohu střechy.

Vstupy:

obraz – Rastr obsahující detekované hrany na výřezu ortofota. Parametr je nutné zadat ve formě názvu souboru a formátu. V případě, že se obraz nenachází ve stejné složce se souborem funkce poloha.m, je nutné zadat i cestu k obrazu.

v_nazev – Rastr obsahující obrys budovy. Forma stejná jako u prohledávaného obrazu.

Výstupy:

kk – Matice výsledných koeficientů korelace vzoru a obrazu.

y – Skalár (přirozené číslo). Obrazová souřadnice y polohy levého horního rohu vzoru s nejvyšším KK v obraze.

x – Skalár (přirozené číslo). Obrazová souřadnice x polohy levého horního rohu vzoru s nejvyšším KK v obraze.

max – Skalár (reálné číslo $<-1;1>$). Nejvyšší hodnota KK.

pocet – Skalár (přirozené číslo). Počet KK, které jsou nejvýše o 10% nižší než maximální hodnota. Tyto koeficienty ukazují další potenciálně správné polohy střechy.

rohy.m

Autor: Petr Hofman

Vytvořena: 18.5.2008

Popis:

Funkce hledá rohy budovy v obraze obsahující obrys budovy. Body náležící stěnám budovy mohou nabývat libovolné kladné hodnoty. Ostatní pixely musí nabývat hodnoty nula. Musí se přitom jednat o budovu s půdorysem rovnostranného čtyřúhelníku.

Algoritmus postupně prochází všechny čtyři strany obrazu. Pro linii nejbližší této straně pak vyhledává body s hodnotou vyšší než 0 a zaznamená polohu prvního a posledního bodu. Pokud není zalezen žádný bod s hodnotou vyšší než 0, prohledává se linie o 1 pozici dále...

Pokud je v linii nalezen pouze jeden bod s hodnotou vyšší než 0, jedná se o roh budovy. Pokud je těchto pixelů nalezeno více, nachází se hledaný roh budovy na prvním, nebo na posledním nalezeném pixelu. Podle toho, který pixel leží blíže některé z dalších stran obrazu.

Vstupy:

obrys – Rastr obsahující obrys budovy. Parametr je nutné zadat ve formě názvu souboru a formátu. V případě, že se obraz nenachází ve stejné složce se souborem funkce poloha.m, je nutné zadat i cestu k obrazu.

Výstupy:

roh – Matice (4x2) obsahující obrazové souřadnice rohů budovy v pořadí (podle stran prohledávaného obrazu): horní, pravý, dolní a levý roh budovy.

strecha.m

Autor: Petr Hofman

Vytvořena: 30.5.2008

Popis:

Funkce určuje nejpravděpodobnější typ střešního pláště z detekovaných hran obrazu budovy. Algoritmus postupně volá další funkce, kterým předává známé rohy budov a velikost naklonění střechy. Tyto funkce vytváří obrazy základních typů střech (rovinná, sedlová, valbová a jehlanová) s různým sklonem střech. Funkce *strecha.m* následně srovnává tyto vzory s obrazem detekovaných hran pomocí koeficientu korelace obou obrazů.

Typ střechy s nejvyšší hodnotou koeficientu korelace je určen jako nejpravděpodobnější typ střešního pláště budovy. Pokud je hodnota koeficientu příliš nízká, nebo se některá hodnota liší od maxima o méně než 10%, je uživatel upozorněn na vysokou pravděpodobnost chybného výsledku.

Vstupy:

img – Rastr obsahující detekované hrany budovy z barevného ortofota.

obrys – Rastr obsahující obrys budovy získaný z DKM. Funkce jej využívá pro určení velikosti výřezu obrazu pro srovnání.

y, x – Obrazové souřadnice určující polohu levého horního rohu vzoru střechy v obrazu detekovaných hran.

rohy – Matice (4x2) obsahující obrazové souřadnice rohů budovy v pořadí (podle stran prohledávaného obrazu): horní, pravý, dolní a levý roh budovy.

Výstupy:

typ – Parametr určující výsledný typ střechy sledované budovy.

1 – rovinná

2 – sedlová (orientace sedla zleva doprava)

3 – sedlová (orientace sedla shora dolů)

4 – valbová

5 – jehlanová (stanová)

kk2 – Matice (1x4) koeficientů korelace jednotlivých typů střech.

chyba – Hodnota tohoto parametru určuje, zda došlo s vysokou pravděpodobností k chybnému určení typu střechy (1), či ne (0).

plocha.m

Autor: Petr Hofman

Vytvořena: 23.5.2008

Popis:

Tato funkce je volána za běhu funkce *strecha.m*. Ze zadaných rohů budovy vytvoří seznam úseček tvořících okraje střechy. Funkce postupně prochází rohy budovy. Pro každé dva po sobě jdoucí rohy vypočte parametry obecné rovnice přímky, která jimi prochází. Následně algoritmus projde všechny pixely ležící v minimax boxu obou rohů. U každého zkontroluje, zda jeho střed leží do vzdálenosti poloviny velikosti pixelu od přímky. Pokud ano, je tento pixel součástí úsečky tvořící stěnu budovy.

Seznam úseček je předán zpět volající funkci. Z tohoto seznamu je následně funkcí *edgelist2image.m* možné vytvořit obraz ploché střechy.

Vstupy:

rohy – Matice (4x2) obsahující obrazové souřadnice rohů budovy v pořadí (podle stran prohledávaného obrazu): horní, pravý, dolní a levý roh budovy.

Výstupy:

seznam – Seznam (1x4), v němž každá buňka obsahuje seznam souřadnic pixelů tvořících okraje budovy.

sedlova.m

Autor: Petr Hofman

Vytvořena: 2.6.2008

Popis:

Tato funkce je volána za běhu funkce *strecha.m*. Ze zadaných rohů budovy vytvoří seznam úseček tvořících hrany sedlové střechy. Funkce nejdříve ze známých rohů budovy a naklonění střechy určí polohu všech uzlových bodů. Následně prochází všechny dvojice bodů, mezi nimiž se nachází hrana střešního pláště a vypočítá parametry obecné rovnice přímky, která jimi prochází. Pro všechny pixely ležící v minimax boxu obou těchto uzlových bodů je zjištěno, zda jeho střed leží do vzdálenosti poloviny velikosti pixelu od této přímky. Pokud ano, je tento pixel součástí úsečky tvořící stěnu budovy.

Seznam úseček je předán zpět volající funkci. Z tohoto seznamu je následně funkcí *edgelist2image.m* možné vytvořit obraz ploché střechy.

Vstupy:

rohy - Matice (4x2) obsahující obrazové souřadnice rohů budovy v pořadí (podle stran prohledávaného obrazu): horní, pravý, dolní a levý roh budovy.

směr - Parametr určující orientaci sedla budovy.

0 - zleva doprava

1 - shora dolů

y, x - Obrazové souřadnice posunutí koncových bodů hrany sedla. Velikost posunutí těchto bodů určuje míru naklonění střechy na ortofotu.

Výstupy:

seznam - Seznam (1x4), v němž každá buňka obsahuje seznam souřadnic pixelů tvořících hrany střešního pláště.

valbova.m

Autor: Petr Hofman

Vytvořena: 2.6.2008

Popis:

Tato funkce je volána za běhu funkce *strecha.m*. Ze zadaných rohů budovy vytvoří seznam úseček tvořících hrany valbové či jehlanové střechy. Funkce nejdříve ze známých rohů budovy a naklonění střechy určí polohu všech uzlových bodů. Následně prochází všechny dvojice bodů, mezi nimiž se nachází hrana střešního pláště a vypočítá parametry obecné rovnice přímky, která jimi prochází. Pro všechny pixely ležící v minimax boxu obou těchto uzlových bodů je zjištěno, zda jeho střed leží do vzdálenosti poloviny velikosti pixelu od této přímky. Pokud ano, je tento pixel součástí úsečky tvořící stěnu budovy.

Seznam úseček je předán zpět volající funkci. Z tohoto seznamu je následně funkcí *edgelist2image.m* možné vytvořit obraz ploché střechy.

Vstupy:

rohy - Matice (4x2) obsahující obrazové souřadnice rohů budovy v pořadí (podle stran prohledávaného obrazu): horní, pravý, dolní a levý roh budovy.

y, x - Obrazové souřadnice posunutí koncových bodů hrany sedla. Velikost posunutí těchto bodů určuje míru naklonění střechy na ortofotu.

Výstupy:

seznam - Seznam (1x4), v němž každá buňka obsahuje seznam souřadnic pixelů tvořících hrany střešního pláště.

typ - Parametr určující půdorys budovy (resp. tvar střešního pláště)

0 - obdélníkový půdorys (valbová střecha)

1 - čtvercový půdorys (jehlanová střecha)

Příloha 2: Popis funkcí určení výšky budovy

Celý algoritmus proběhne zavoláním hlavní funkce *vyskastrechy.m*. Popis jednotlivých funkcí je řazen podle jejich návaznosti v algoritmu. Na konec je zařazena funkce *redeni.m*, která není součástí popsané metody, ale slouží pro snížení hustoty mračna laserových bodů.

Příklad volání funkcí

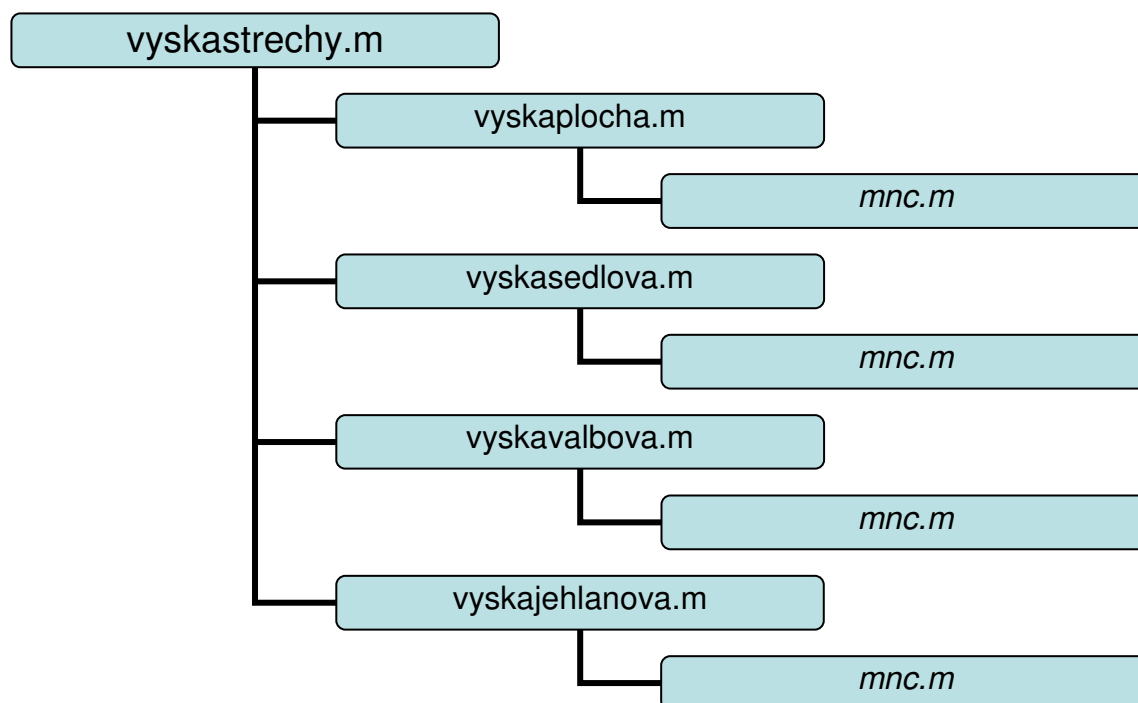
Rovinná střecha - `[vyska, chyba] = vyskastrechy(1, rohy, leva)`

Sedlová střecha - `[vyska, chyba] = vyskastrechy(2, rohy, leva, prava)`

Valbová střecha - `[vyska, chyba] = vyskastrechy(4, rohy, leva, prava, horni, dolni)`

Jehlanová střecha - `[vyska, chyba] = vyskastrechy(5, rohy, leva, prava, horni, dolni)`

Schéma návaznosti funkcí



vyskastrechy.m

Autor: Petr Hofman

Vytvořena: 22.6.2008

Popis:

Hlavní volající funkce tvořící základ algoritmu pro určení výšky střechy budovy. Podle zadaného typu střešního pláště zavolá příslušné funkce, kterým předá souřadnice rohů budovy a laserových bodů jednotlivých střešních rovin. Poté od nich převezme výšku budovy a případně i informaci o chybě ve výpočtu, které jsou výstupem celé funkce.

Vstupy:

typ - typ střešního pláště: plochá (1), sedlováLP (2), sedlováHD (3), valbová (4), jehlanová (5).

rohy - Matice souřadnic rohů budovy v systému JTSC (X, Y)

leva, prava - Matice souřadnic (X, Y) a výšek (Z) laserových bodů hlavních střešních rovin.
Pokud se jedná o plochou střechu, obsahuje argument leva všechny body střechy.
horni, dolni - Matice souřadnic (X, Y) a výšek (Z) laserových bodů vedlejších střešních rovin.
Argumenty se zadávají pouze v případě, kdy se jedná o valbovou či jehlanovou střechu.

Výstup:

vyska - výška budovy (m n.m.)

chyba - Parametr určující, zda došlo pravděpodobně při výpočtu k chybě (1), nebo ne (0).

vyskaplocha.m

Autor: Petr Hofman

Vytvořena: 22.6.2008

Popis:

Funkce určující výšku budovy s rovinnou střechou. Souřadnice laserových bodů střešní roviny předá funkci *mnc.m*, která vrátí parametry obecné rovnice roviny a případně i informaci o chybě ve výpočtu parametrů. Pokud je výsledná rovina vodorovná, určí se výška střechy jako střední hodnota laserových bodů. Pokud ne, vypočítá se nadmořská výška rohů střechy. Výška nejvyššího bodu je výškou střechy.

Vstupy:

rohy - Matice souřadnic rohů budovy v systému JTSC (X, Y)

body - Matice souřadnic (X, Y) a výšek (Z) laserových bodů střešní roviny.

Výstup:

vyska - výška budovy (m n.m.)

chyba - Parametr určující, zda došlo pravděpodobně při výpočtu k chybě (1), nebo ne (0).

vyskasedlova.m

Autor: Petr Hofman

Vytvořena: 22.6.2008

Popis:

Funkce určující výšku budovy se sedlovou střechou. Souřadnice laserových bodů obou střešních rovin předá funkci *mnc.m*, která vrátí parametry obecných rovnic rovin a případně i informaci o chybě ve výpočtu parametrů. Dosazením polohy koncových bodů sedla střechy (získaných ze souřadnic rohů budovy) se získá jejich výška v obou střešních rovinách. Protože neznáme pořadí rohů budovy vyexportovaných z programu ArcView, je nutné vypočítat výšku bodů pro obě možné orientace sedla. Následně je vybráno sedlo u nějž se výška koncových bodů nejméně liší.

Aritmetický průměr výšek obou koncových bodů levé i pravé střešní roviny představuje výslednou výšku budovy. Pokud se všechny čtyři hodnoty výšek od sebe liší o více než 0,5m, došlo pravděpodobně k chybnému určení výšky, na což je uživatel upozorněn. Pokud došlo k chybě už ve funkci *mnc.m*, je výpočet pokládán za chybný i zde.

Vstupy:

rohy - Matice souřadnic rohů budovy v systému JTSC (X, Y)

leva, prava - Matice souřadnic (X, Y) a výšek (Z) laserových bodů dvou střešních rovin.

Výstup:

vyska - Výška budovy (m n.m.)

chyba - Parametr určující, zda došlo pravděpodobně při výpočtu k chybě (1), nebo ne (0).

vyskavalbova.m

Autor: Petr Hofman

Vytvořena: 24.6.2008

Popis:

Funkce určující výšku budovy s valbovou střechou. Souřadnice laserových bodů čtyř střešních rovin předá funkci *mnc.m*, která vrátí parametry obecných rovnic rovin a případně i informaci o chybě ve výpočtu parametrů. Protože není jisté, jestli mají rohy budovy správné pořadí, je nutné je nejprve srovnat. Ze souřadnic rohů budovy jsou pak vypočítány souřadnice vnitřních uzlových bodů valbové střechy. Dosazením jejich polohy do rovnic dvou hlavních rovin se určí jejich výška. Pokud se poloha bodů v obou rovinách liší o více než 0,5m, je uživatel upozorněn na chybu. Pokud došlo k chybě už ve funkci *mnc.m*, je výpočet pokládán za chybný i zde.

Dosazením polohy uzlových bodů do vedlejších střešních rovin je vypočítána kontrolní výška. Pokud se kontrolní výška od původní příliš neliší, je vypočítán nový průměr výšky uzlových bodů. V opačném případě není kontrolní výška brána v úvahu. Průměr výšek obou uzlových bodů určuje výslednou výšku budovy.

Vstupy:

rohy - Matice souřadnic rohů budovy v systému JTSC (X, Y)

leva, prava - Matice souřadnic (X, Y) a výšek (Z) laserových bodů hlavních střešních rovin.

horní, dolní - Matice souřadnic (X, Y) a výšek (Z) laserových bodů vedlejších střešních rovin.

Výstup:

vyska - Výška budovy (m n.m.)

chyba - Parametr určující, zda došlo pravděpodobně při výpočtu k chybě (1), nebo ne (0).

vyskajehlanova.m

Autor: Petr Hofman

Vytvořena: 24.6.2008

Popis:

Funkce určující výšku budovy s jehlanovou střechou. Souřadnice laserových bodů čtyř střešních rovin předá funkci *mnc.m*, která vrátí parametry obecných rovnic rovin a případně i informaci o chybě ve výpočtu parametrů. Dosazením polohy centrálního bodu je získána výška vrcholu střechy ve všech čtyř rovinách. Neliší-li se od sebe hodnoty o více než 0,5m, je výsledná výška budovy určena průměrem všech čtyř hodnot. V opačném případě je nejodlehlejší hodnota z výpočtu vypuštěna. Pokud se i zbylé tři hodnoty od sebe liší o více než 0,5m, je uživatel upozorněn na pravděpodobnou chybu výpočtu. Pokud došlo k chybě už ve funkci *mnc.m*, je výpočet pokládán za chybný i zde.

Vstupy:

rohy - Matice souřadnic rohů budovy v systému JTSC (X, Y)

leva, prava, horní, dolní - Matice souřadnic (X, Y) a výšek (Z) laserových bodů čtyř střešních rovin.

Výstup:

vyska - Výška budovy (m n.m.)

chyba - Parametr určující, zda došlo pravděpodobně při výpočtu k chybě (1), nebo ne (0).

mnc.m

Autor: Petr Hofman

Vytvořena: 1.7.2008

Popis:

Funkce převede souřadnice mračna laserových bodů x, y, z na parametry a, b, c obecné rovnice roviny v prostoru ($z = a \cdot x + b \cdot y + c$). Pro určení polohy roviny využívá vyrovnaní pomocí metody nejmenších čtverců. Výpočet probíhá v několika iteracích. Po prvním výpočtu polohy roviny se provede kontrola všech bodů. Pokud vzdálenost od roviny některého z bodů přesahuje prahovou hodnotu 0.1m, je nejvzdálenější bod odstraněn a parametry roviny se přepočítají. Výpočet pokračuje, dokud není dosaženo uspokojivého výsledku (žádný z bodů nepřesahuje prahovou hodnotu).

Cyklus je ukončen také v případě, kdy je odstraněno více než polovina bodů, nebo zůstane méně než 10 bodů. V tomto případě je uživatel upozorněn na pravděpodobně nepřesné určení polohy roviny.

Vstup:

body - Matice souřadnic (X, Y) a výšek (Z) laserových bodů střešní roviny

Výstupy:

dx - Vektor obsahující parametry a, b, c obecné rovnice roviny v prostoru ($z = a \cdot x + b \cdot y + c$).

chyba - Parametr určující, zda došlo pravděpodobně při výpočtu k chybě (1), nebo ne (0).

redeni.m

Pozn. Funkce není součástí metody, ale pouze práce. Bylo nutné zředit bodové mračno laserových bodů, aby metoda ukázala svou funkčnost i při nízké hustotě dat.

Autor: Lucie Pikhartová

Upravil: Petr Hofman

Popis:

Funkce nejdříve určí přibližnou hustotu vstupního bodového mračna. Protože by bylo velmi obtížné určit skutečné rozměry plochy, kterou body pokrývají, je hustota určena jako počet bodů na plochu minmax boxu mračna (body/m^2).

Pokud hustota bodů přesahuje prahovou hodnotu definovanou parametrem *prah*, je jejich počet snížen pod tuto hodnotu. Při nastavení parametru *prah* na hodnotu 1, je výsledná hustota bodů přibližně $1 \text{ bod}/\text{m}^2$. Platí přitom podmínka, že množství bodů v seznamu nesmí klesnout pod 10.

Vstupy:

B - Matice(:, 3) laserových bodů se souřadnicemi x, y, z .

prah - Prahová hodnota určující maximální hustotu mračna bodů.

Výstupy:

body - Matice(:, 3) s redukováným počtem laserových bodů se souřadnicemi x, y, z .

hustotapuv - Původní hustota bodového mračna.

hustotasouc - Hustota bodového mračna po zředění.

Provedené změny:

Funkce byla upravena tak, aby neředila seznam podle předem zadaného maximálního množství bodů, ale podle uživatelem zvolené hustoty bodů.

Dále byla přidána podmínka, aby množství bodů v seznamu nekleslo pod 10 bodů.

Př. volání:

[body2, hustotapuv, hustotasouc] = redeni(body, 1)